МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Ю. БОРИСОВ

Инфракрасные излучения

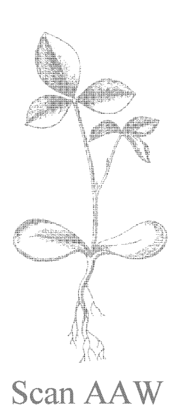


МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Выпуск 906

Ю. БОРИСОВ

ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1976

6Ф9
Б82
УДК 621.384.3

Борисов Ю.

Б82 Инфракрасные излучения. М., «Энергия», 1976

56 с с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 906)

В книге кратко изложены основные особенности излучения инфракрасного диапазона волн; рассказано о методах и аппаратуре, применяемых в инфракрасной технике. основных направлениях применения этой области техники в народном хозяйстве, научных исследованиях и в изучении космоса; рассмотрены возможные перспективы применения инфракрасной техники в народном хозяйстве.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся новыми направлениями в современной радиоэлектронике.

Б $\frac{30401\text{-}258}{051(01)\text{-}76}$ 170-76 6Ф9

ПРЕДИСЛОВИЕ

Инфракрасная техника — это область современной физики и электроники, охватывающая вопросы излучения, распространения и регистрации колебаний инфракрасного (ИК) диапазона электромагнитных волн, а также их практического использования в науке, технике, народном хозяйстве и в военном деле. Она представляет собою одно из важнейших направлений современной радиоэлектроники и физики и призвана сыграть весьма ответственную роль во внедрении новых прогрессивных процессов в различные отрасли народного хозяйства, а также в развитии фундаментальных и прикладных научных исследований. Сегодня ИК техника широко используется для решения самых разнообразных задач в народном хозяйстве страны.

За последнюю четверть века достигнуты большие успехи в освоении ИК диапазона волн: разработаны новые эффективные источники ИК излучения, высокочувствительные приемники излучения ИК диапазона волн, разнообразная техническая и промышленная аппаратура. Все большее число новых методов, приборов и устройств, применяющихся за стенами лабораторий, основывается на использовании ИК излучения.

Развитие ИК техники неразрывно связано с именами таких выдающихся отечественных ученых, как С. И. Вавилов, П. Н. Лебедев, А. Г. Столетов, а также зарубежных ученых Г. Герца, В. Кирхгофа, М. Планка, А. Эйнштейна.

В нашей стране за последние годы достигнуты значительные успехи в разработке современных ИК приборов и их использовании в народном хозяйстве и научных исследованиях. В развитии этой области приборостроения большую роль сыграли работы советских ученых и специалистов.

Инфракрасная техника приобретает все возрастающее значение в научных исследованиях, биологии, медицине и инженерной практике. Большая роль отводится ИК технике в широко развернувшихся в последнее время исследованиях космического пространства при спектроскопических исследованиях Земли и планет. Расширяются возможности применения ИК техники в связи с созданием

оптических квантовых генераторов, излучающих в ИК диапазоне волн.

Задача настоящей книги — познакомить широкий круг читателей с основными видами применения ИК техники в научных исследованиях и народном хозяйстве и рассказать о некоторых перспективах ее дальнейшего применения. В книге обобщено и систематизировано большое количество разнообразного материала по отдельным вопросам применения ИК техники, появившегося за последние годы в печати. В ней в сжатой форме рассказывается об аппаратуре и основных видах использования ИК излучений в различных областях современной науки и техники. Можно надеяться, что приведенные в книге сведения окажутся полезными читателям и помогут им в их практической деятельности.

Автор

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИК ТЕХНИКЕ

Инфракрасная область оптического диапазона электромагнитных волн была открыта в 1800 г. английским ученым У. Гершелем при исследовании распределения энергии в спектре солнечного излучения. Инфракрасный диапазон волн расположен между видимым и радиодиапазонами и занимает область от 0,75 до 750 мкм. Интерес ученых к ИК области спектра обусловлен обнаружившимися здесь особенностями взаимодействия излучения с веществом.

Оказалось, что все тела обладают инфракрасным излучением. Инфракрасное излучение возникает при движении молекул вещества, так что в принципе ИК лучи испускают все тела, обладающие температурой выше абсолютного нуля, поскольку движение молекул прекращается только при 0 К. Это тепловое излучение; оно является некогерентным и обладает широким спектром. Переходы атомов и молекул из одного энергетического состояния в другое также сопровождаются излучением, лежащим большей частью в ИК области спектра. На этих явлениях основано применение ИК излучения в науке и технике для целей спектроскопии, локации и передачи информации.

Особенно широкое применение ИК излучения в науке и технике получили за последние десятилетия. За эти годы методы и аппаратура ИК техники стали широко использоваться в самых различных областях науки, техники и народного хозяйства. Особенно широкое применение ИК диапазона волн в современной науке и технике началось во второй половине XX века после создания эффективных ИК приемников для области 1,5—10 мкм. Использование энергии электромагнитного излучения этой части ИК спектра значительно расширило возможности многих областей науки и техники.

Основными областями применения ИК техники в науке и народном хозяйстве являются: радиометрия и спектроскопия, наблюдение и фотографирование, обнаружение и локация и др.

Если объект излучает в ИК области спектра, его можно обнаружить аппаратурой, определить направление и расстояние до него. При измерении суммарного лучистого потока от объекта ИК аппаратура решает радиометрические задачи, а при измерениях его в узком спектральном диапазоне — спектроскопические задачи. Если объект, излучающий ИК лучи, является протяженным источником, ИК аппаратура может быть использована для получения пространственного распределения его лучистого потока и получения теплового (термографического) изображения объекта. При этом может быть использовано как собственное излучение объекта, так и отраженное от него ИК излучение других источников: естественных (Солнце)

или искусственных. Искусственный источник может быть установлен на исследуемом объекте или встроен в аппаратуру для освещения объекта.

Применение ИК излучения в современной науке и технике имеет и свои ограничения. Они обусловлены главным образом тем, что, в отличие от радиоволн, ИК излучения при распространении в атмосфере претерпевают значительное затухание вследствие поглощения и рассеяния. Рассеяние ИК излучения происходит на взвешенных в атмосфере частицах (пыль, вода). Атмосферные газы (главным образом водяной пар и углекислый газ) поглощают ИК излучения в некоторых областях спектра. В космическом пространстве вследствие отсутствия поглощающей среды распространение ИК излучения происходит с ничтожными потерями.

Ввиду того что атмосферное поглощение является неодинаковым для отдельных областей ИК спектра, при использовании ИК приборов в земных условиях наибольший интерес представляют те области, в которых ИК излучения распространяются в атмосфере со сравнительно малыми потерями. Эти области ИК спектра получили название окон прозрачности атмосферы для ИК излучений. Положение окон прозрачности для земной атмосферы было определено в результате проведения многочисленных исследований. Первое окно прозрачности простирается приблизительно от волны 0,75 мкм (границы видимого диапазона) до волны 1,7 мкм и соответствует так называемой ближней ИК области спектра. Второе и третье окна лежат в средней и частично в дальней области ИК спектра и занимают участки от 3 до 5 мкм и от 7 до 14 мкм соответственно (дальняя область ИК излучений занимает диапазон волн, начиная от 10 мкм).

Принцип работы ИК приборов основан на преобразовании инфракрасного излучения тел, к которому нечувствителен человеческий глаз, в видимое. Спектральный состав и интенсивность излучения любого предмета в ИК области спектра определяются его температурой и излучательной способностью. Для обнаружения ИК излучения в ИК приборах используются различные виды приемников: тепловые и фотоэлектрические, а также специальные фотоматериалы, чувствительные к инфракрасному излучению.

По своему построению и принципу действия большинство ИК приборов представляют собой оптико-электронные устройства. Основная обработка поступающей информации об излучающем объекте в оптико-электронных устройствах сопровождается преобразованием принимаемой лучистой энергии в электрические сигналы. Поэтому в состав таких приборов входят как оптические, так и электронные устройства и каждое из них выполняет основные функции прибора. Оптические устройства служат для того, чтобы сконцентрировать и направить принимаемое ИК излучение на приемник. Электронные устройства предназначены для первичной обработки преобразованной приемником информации, содержащейся в принятом им лучистом потоке от исследуемого объекта. Высокое угловое разрешение оптических систем, обусловленное относительно короткими длинами волн ИК излучений, позволяет осуществлять пеленгацию объектов по их тепловому излучению с точностью, не доступной приборам, работающим в радиодиапазоне.

Инфракрасные приборы по принципу действия могут быть также разделены на пассивные и активные. В пассивных ИК приборах используется собственное ИК излучение объектов или отраженное

от них излучение естественных источников. Большинство ИК приборов относится к этой группе приборов. В активных ИК приборах используются различные встроенные искусственные источники ИК излучения, освещающие исследуемые объекты. В последние годы в связи с успехами квантовой электроники на первое место среди искусственных источников ИК излучения для активных ИК приборов выходят оптические квантовые генераторы (ОКГ) — лазеры, генерирующие монохроматическое (одноцветное) когерентное ИК излучение, имеющее узкий спектр и относительно большую мощность.

Отсутствие в пассивных ИК приборах источников ИК излучения дает им целый ряд преимуществ. Такие приборы отличаются значительно меньшими массой и габаритами по сравнению с активными и являются поэтому весьма транспортабельными. Они могут также работать совместно с отдельными внешними источниками ИК излучения (ИК прожекторами), освещающими объект или расположенными на нем.

Рассмотрим теперь наиболее распространенные типы ИК приборов.

Радиометры и радиационные пирометры применяются для обнаружения ИК излучения объектов и измерения его интенсивности. Радиометр определяет мощность излучения объекта, а радиационный пирометр — его температуру. Для обеспечения возможности работы в различных областях ИК спектра в них используются ИК фильтры, выделяющие нужный участок спектра. В большинстве этих приборов применяется компенсационный метод измерений. В соответствии с этим методом на приемник поочередно направляются излучения от объекта и эталонного источника. Изменяя мощность излучения эталонного источника, добиваются получения нулевого сигнала на выходе прибора, что соответствует равенству лучистых потоков от объекта и эталонного источника на входе приемника. В качестве эталонного источника для градуировки приборов используется черное тело, нагретое до известной температуры.

Структурная схема радиометра изображена на рис. 1. Инфракрасное излучение от объекта фокусируется оптической системой *1* на неселективном приемнике (болометре) *4*. При помощи секторного диска-модулятора *6*, вращаемого двигателем *5*, на приемник *4* поступают попеременно излучения от объекта и эталонного источника *2*. Для этого поверхности секторов модулятора, обращенные к приемнику, выполняются зеркальными. Применение модуляции лучистых потоков позволяет усиливать сигналы с выхода приемника узкополосным усилителем *8*, вследствие чего чувствительность прибора возрастает. Модулирующий диск *6*, вращаясь, одновременно перекрывает сигнальную лампочку, освещающую фототриод, входящий в схему генератора опорных напряжений *7*. Этот генератор формирует синхронизирующие импульсы, которые управляют переключателем сигналов синхронного выпрямителя *9*. При проведении измерений промодулированные модулятором *6* сигналы от эталонного источника и объекта поступают поочередно на измерительный прибор *10* и сравниваются по величине.

Для определения интенсивности ИК излучения от объекта температура эталонного источника *2* изменяется до получения на этом приборе нулевого сигнала. Наведение радиометра на исследуемый объект осуществляется при помощи оптического визира с перекрестием, установленного на его оптической системе *1*. Чувствитель-

ность радиометров такого типа составляет 10^{-10}—10^{-11} Вт/см². Это позволяет отличать друг от друга объекты, разница в температуре которых достигает 0,01° С. Прибор обладает инерционностью 16 мс.

Принцип действия радиационного пирометра может быть пояснен при помощи структурной схемы, представленной на рис 2. Ос-

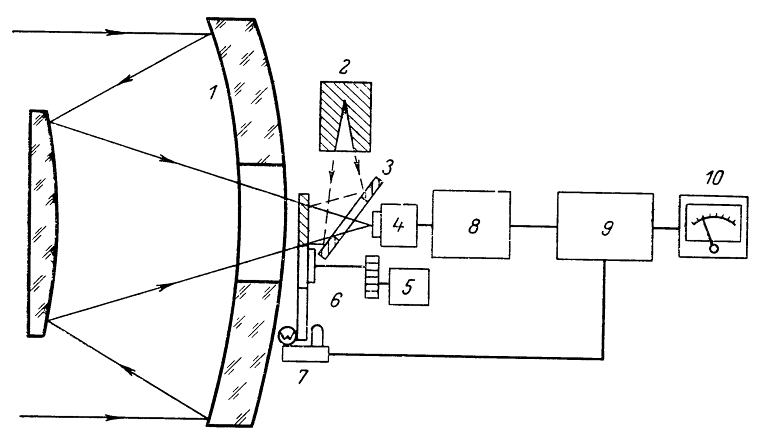


Рис. 1. Схема ИК радиометра.

1 — оптическая система; *2* — эталонный источник; *3* — зеркало, *4* — болометр; *5* — электродвигатель; *6* — модулятор (механический прерыватель), *7* — генератор; *8* — усилитель; *9* — синхронный выпрямитель, *10* — измерительный прибор.

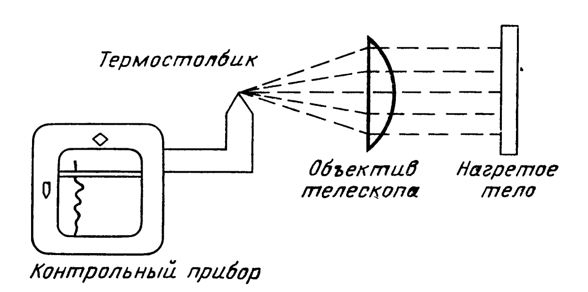


Рис. 2. Схема работы радиационного пирометра.

новной частью пирометра является оптический телескоп. Наведение телескопа радиационного пирометра на объект производится при помощи встроенного оптического визира с перекрестием. Объектив телескопа фокусирует ИК излучение от объекта на рабочую площадку приемника (термостолбика) и на выходе приемника возникает напряжение, которое затем измеряется контрольным прибором (милливольтметром, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия) или автоматическим потенциометром, производящим запись измеряемой температуры на бумажную ленту.

Простейший отечественный радиационный пирометр «РАПИР» позволяет по ИК излучению определять усредненную температуру нагретых тел диаметром до 200 мм в пределах от 100 до 4000° С при расстоянии до нагретой поверхности от 400 до 1500 мм. Градуируется пирометр по внешнему черному телу.

Спектральный анализ. Спектральным анализом называется определение химического состава вещества, а также исследование строения его атомов и молекул по положению и относительной интенсивности спектральных линий излучения и поглощения этого вещества.

У любого вещества ИК спектр имеет совершенно определенный характер. Он состоит из множества отдельных линий, разделенных узкими спектральными интервалами. Типичный ИК спектр поглощения вещества, полученный при прохождении ИК излучения через его тонкий слой, изображен на рис. 3.

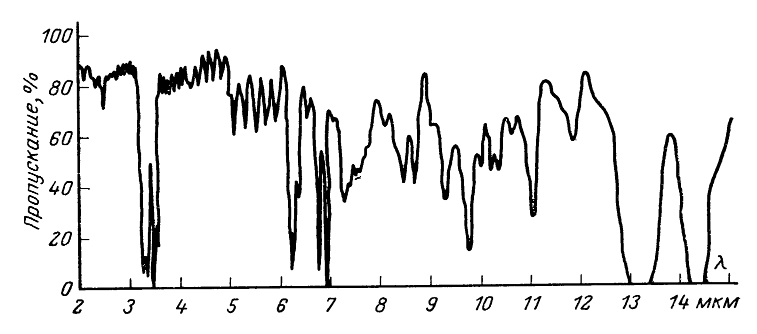


Рис. 3. Спектральная кривая пропускания полистироловой пленки.

Спектральный анализ дает возможность определять не только процентный состав взятого вещества, в том числе процентное содержание отдельных изотопов химических элементов, но и изучать строение молекул и атомов вещества (положение и характер орбит электронов в атомах, вероятность перехода их с одних орбит на другие), а также решать целый ряд других задач.

Инфракрасная спектроскопия широко используется современной наукой и техникой для детального изучения свойств и состава различных веществ по спектрам поглощения и излучения в ИК области.

Приборы для осуществления спектрального анализа ИК излучений различных физических тел (спектральные приборы) разделяют принятое излучение по длинам волн на отдельные составляющие. Излучение, разделенное на составляющие по длинам волн, называется спектром. Эти приборы должны обладать высокой чувствительностью и разрешающей способностью, осуществлять быструю и, предпочтительно, автоматическую запись спектра, работать в широком спектральном интервале.

Спектральные приборы позволяют разложить падающее излучение в спектр и зафиксировать положение отдельных спектральных линий, измерить интенсивность излучения в определенном участке спектра, а также отдельной линии спектра.

Спектральные приборы для исследований в ИК области спектра состоят из источника излучения, монохроматора и фотометрической части с регистрирующим устройством. Монохроматор является основным узлом спектральных приборов с различными типами приемников. Он является единственно пригодным прибором при измерении спектральных характеристик излучения. На рис. 4 изображена оптическая схема простейшего монохроматора. Он состоит из входной щели *1*, приспособления (обычно призмы) *3* для разложения (дисперсии) падающего излучения от теплового излучателя по длинам волн и оптических систем *2* и *4* для получения спектральных линий, являющихся монохроматическими изображениями щели *1*. Разложение излучения призмой происходит потому, что показатель преломления ее материала различен для разных длин волн. Спект-

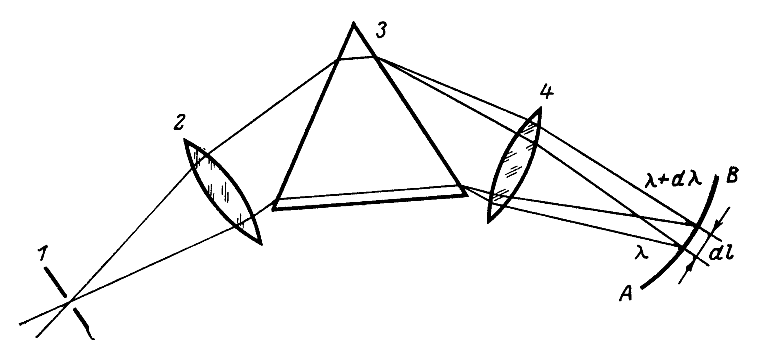


Рис. 4. Оптическая схема построения монохроматора.

1 — входная щель; *2* — линза коллиматора; *3* — диспергирующая призма; *4* — фокусирующая линза; *AB* — кривая, вдоль которой сфокусирован спектр.

ральные линии выходного излучения прибора располагаются вдоль фокальной кривой *AB*. Они могут быть сфотографированы на помещенную здесь фотопленку. Для выделения узких участков спектра выходного излучения в плоскости *AB* помещается узкая щель, через которую проходит только небольшой участок спектра. Перемещая щель в плоскости *AB* или поворачивая призму *3*, можно выделить на выходе монохроматора необходимый узкий участок спектра. Спектральный диапазон монохроматора определяется материалом призмы и деталей оптических систем. В диапазоне длин волн 0,76—2,5 мкм применяют призмы из стекла или кварца, а в диапазоне 2,5—25 мкм — призмы из фтористого лития, каменной соли, бромистого калия и других веществ.

По способу регистрации спектра спектральные приборы подразделяются на спектроскопы, спектрографы, спектрометры и монохроматоры. В спектроскопах спектр наблюдается непосредственно глазом на экране, устанавливаемом за разлагающим элементом. В спектрографах спектр регистрируется на фотопластинку. В спектрометрах измерение спектров производится фотоэлектрическим методом. Этот метод обладает точностью отсчета до 0,1%. Визуальный и фотометрический методы обладают меньшей точностью (порядка 10%). Спектральный прибор с фотометрическим устройством, измеряющий коэффициенты пропускания различных веществ, называется

спектрофотометром. В монохроматорах интересующий участок спектра выделяется выходной щелью.

Отечественной промышленностью для исследований в ИК области спектра выпускаются одноканальные спектрометры ИКС-12, ИКС-21, двухканальные спектрофотометры ИКС-14 и ИКС-22 и другие.

Спектрометр ИКС-12 предназначен для получения и автоматической регистрации спектров в диапазоне 0,75—25 мкм. Источником излучения в нем служит силитовый стержень (глобар) с яркостной температурой 1300—1400° С. Его излучение проходит через тонкий слой исследуемого вещества, а затем на входную щель монохроматора. С выхода монохроматора спектр излучения глобара, прошедшего через исследуемое вещество, поступает на неселективный приемник (вакуумный термоэлемент). Сигнал с его выхода после уси-

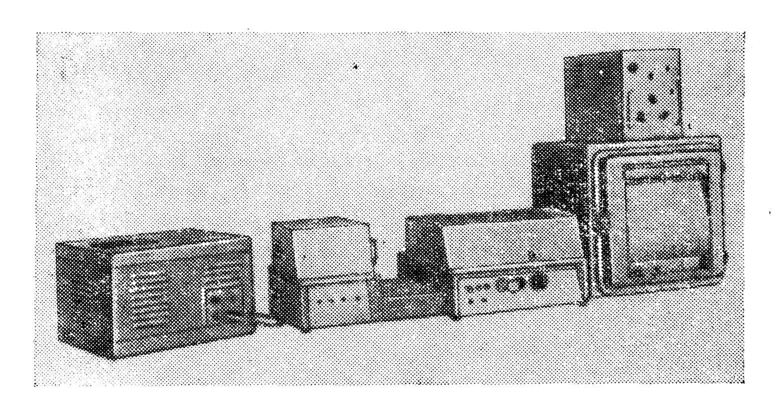


Рис. 5. Инфракрасный спектрометр ИКС-21.

ления поступает на самописец регистрирующего устройства для записи на бумажную ленту.

Спектрометр ИКС-21 (рис. 5) является модернизацией предыдущего прибора, главным образом в отношении приемно-усилительной части. Приемником излучения в спектрометре является висмутовый болометр с пороговой чувствительностью $(2 \div 5) \cdot 10^{-10}$ Вт. Рабочий диапазон прибора от 2 до 15 мкм. Монохроматор прибора ИКС-21 выпускается также в виде отдельного прибора — ИКМ-1.

Спектрофотометр ИКС-14 предназначен для автоматической регистрации на бумажной ленте спектров поглощения твердых и газообразных веществ и измерения величины поглощения ими излучений в области 0,75—25 мкм. Пороговая чувствительность прибора 6×10^{-10} Вт. Источником излучения в спектрофотометре служит силитовый стержень с яркостной температурой 1300—1400° С. Излучение его распределяется оптической системой прибора поровну по двум каналам, при этом в одном канале устанавливается кювета с исследуемым веществом, а в другом — с образцом для сравнения. С выходов каналов оба потока излучения поступают на вращающийся зеркальный модулятор-прерыватель, направляющий их поочередно на входную щель монохроматора, откуда они поступают

на неселективный приемник (висмутовый болометр). При поглощении части излучения источника в исследуемом образце на приемник будут поступать попеременно лучистые потоки различной интенсивности и в результате на выходе приемника возникает электрический сигнал с частотой, равной частоте переключения потоков излучения модулятором. Этот сигнал поступит затем на схему управления положением переменного оптического ослабителя (оптического клина), установленного в канале с образцом, и будет вызывать изменение положения ослабителя до тех пор, пока разностный сигнал на выходе приемника не станет равным нулю. Фотометрический оптический клин механически связан с самописцем регистрирующей части прибора и его перемещения записываются на бумажной ленте самописца в виде кривой, пропорциональной величине поглощения излучения в исследуемом образце.

Другим отечественным спектрофотометром, построенным по аналогичной схеме, является спектрофотометр ИКС-22, работающий в диапазоне 2—15 мкм.

Для ИК спектроскопии мелких неоднородных образцов применяются ИК микроскопы. В состав микроскопа входит оптическая система, концентрирующая поток ИК излучения от выходной щели ИК спектрометра на исследуемом образце. Затем изображение увеличивается и фокусируется на приемник. Увеличение микроскопа достигает 200, а толщина исследуемых при его помощи образцов может составлять несколько микрометров.

Инфракрасный микроскоп МИК-1 предназначен для визуального наблюдения объектов, излучающих в видимой и ИК областях спектра в диапазоне волн 0,8—1,3 мкм. Для получения видимого изображения используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Увеличение микроскопа достигает 180 раз.

Фотографирование в ИК диапазоне (ИК фотографирование) позволяет выявить целый ряд деталей и особенностей предметов, не различимых при обычном их фотографировании в видимом свете. Это связано с тем, что предметы обладают в ИК области спектра иными, чем в видимой области, коэффициентами поглощения, отражения и преломления. Сама атмосфера является более прозрачной для ИК излучений, чем для видимого света. Это дает возможность фотографировать в ИК лучах более отдаленные предметы. Кроме того, ИК фотографирование может осуществляться как днем, так и ночью, так как в солнечном свете более половины лучистой энергии приходится на долю ИК спектра. При дневном фотографировании в ИК лучах объектив фотоаппарата закрывается специальным ИК фильтром, пропускающим излучения с длиной волны более 0,7 мкм.

Для получения фотоснимков в ИК лучах применяются специальные сенсибилизированные (с повышенной чувствительностью к ИК излучению) фотоматериалы — инфрахроматические фотопластинки и фотопленки. Отечественная промышленность выпускает инфрахроматические пластинки «Инфрахром-760», «Инфрахром-840» и «Инфрахром-880» с чувствительностью, равной соответственно 1,4, 0,18 и 0,02 единицы. Цифры в названии пластинок указывают область длин волн в миллимикронах, к которой сенсибилизирована фотоэмульсия. На рис. 6 изображены кривые спектральной чувствительности этих фотопластинок.

Фотографирование в ИК лучах на эти фотоматериалы производится специальными фотокамерами с длиннофокусными объекти-

вами, скорректированными для получения резких изображений предметов в ИК лучах. Однако инфрахроматические фотоматериалы обладают низкой и нестабильной во времени чувствительностью. Этот недостаток может быть преодолен путем предварительного преобразования невидимого ИК изображения в видимое (оптическое), которое может быть затем сфотографировано на обычные

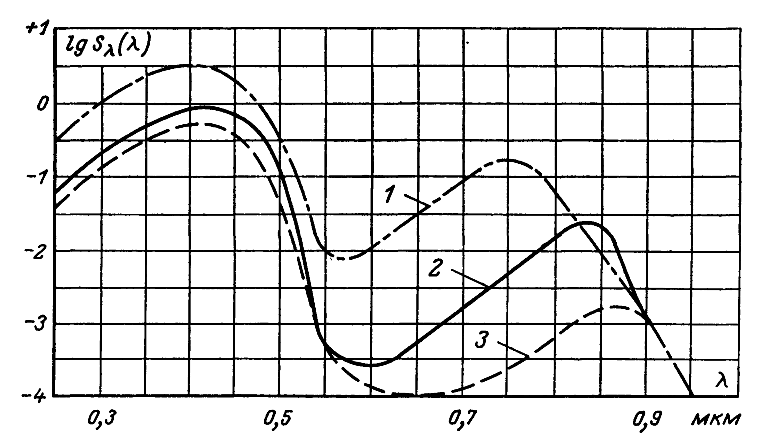


Рис. 6. Кривые спектральной чувствительности инфрахроматических эмульсий.

1 — „Инфрахром-760"; *2* — „Инфрахром-840"; *3* — „Инфрахром-880".

высокочувствительные и достаточно стабильные фотоматериалы. Преобразование невидимого ИК изображения в видимое может быть осуществлено при помощи электронно-оптического преобразователя, эвапорографа, тепловизора и другими способами.

На рис. 7 изображена принципиальная схема фотографирования в ИК лучах с применением электронно-оптического преобразователя.

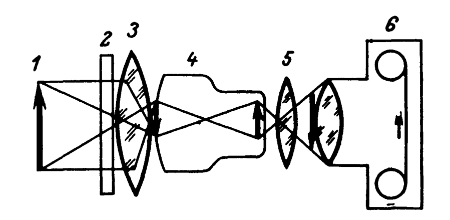


Рис. 7. Принципиальная схема фотокамеры с электронно-оптическим преобразователем.

1 — фотографируемый объект; *2* — ИК фильтр; *3* — объектив; *4* — электронно-оптический преобразователь; *5* — оптическая система; *6* — фотопленка.

Лучистый поток, отраженный от фотографируемого объекта *1*, после прохождения через ИК фильтр *2* фокусируется объективом *3* на фотокатод электронно-оптического преобразователя *4*. Видимое изображение объекта, полученное на экране преобразователя, переносится с помощью оптической системы *5* на фотопленку *6*. Система, состоящая из проектирующего объектива, преобразователя и

системы переноса видимого изображения на фотопленку, называется электронно-оптическим объективом.

К недостаткам такого объектива следует отнести худшую (по сравнению с обычными объективами) разрешающую способность за счет более низкой разрешающей способности электронно-оптического преобразователя. Этот недостаток частично может быть устранен применением в преобразователе комбинированной фокусировки электронов электростатическим и магнитным полями, а также повышением фокусирующего напряжения на электродах. Светосила преобразователя может быть увеличена подбором цвета свечения его экрана в соответствии со спектральной характеристикой чувствительности фотоэмульсии фотоматериала. Применение электронно-оптического

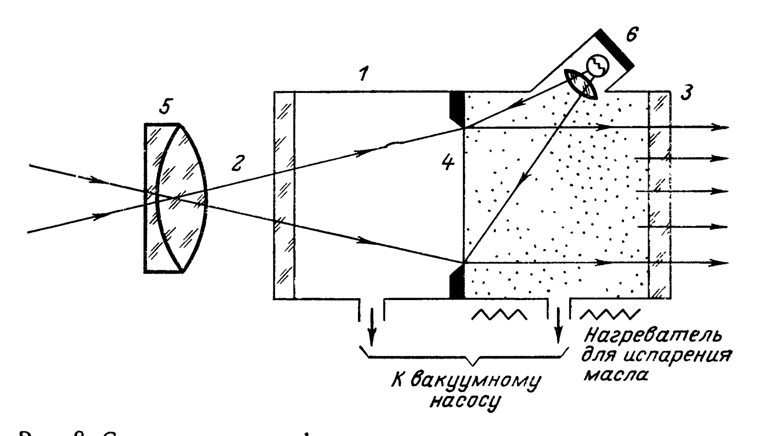


Рис. 8. Схема эвапорографа.

1 — сосуд; *2* — входное окно; *3* — выходное окно; *4* — тонкая слюдяная пленка; *5* — объектив; *6* — осветитель.

объектива позволяет осуществлять фотографирование в ИК лучах при низких уровнях освещенности, исключающих применение инфрахроматических и обычных фотоматериалов.

В изложенных выше методах фотографирование в ИК лучах осуществляется за счет отраженного или собственного ИК излучения объектов, лежащего в ближней области ИК спектра (до 1,2 мкм), к которому чувствительны инфрахроматические фотоматериалы и фотокатоды электронно-оптических преобразователей.

Фотографирование в более длинноволновой области ИК спектра может быть осуществлено с помощью метода эвапорографии, предложенного в 1929 г. немецким физиком Черни. Суть этого метода состоит в регистрации проектируемого на поверхность ИК изображения по испарению вещества с этой поверхности. На рис. 8 изображена принципиальная схема эвапорографа. Чувствительным элементом в нем является тонкая пленка толщиной менее 1 мкм из слюды (или целлулоида) *4*, покрытая с одной стороны тонким слоем вещества, хорошо поглощающего ИК излучение (например, сажей). Другая сторона пленки покрывается тонким слоем (около 0,5 мкм) какой-либо вязкой жидкости, легко испаряющейся при об-

лучении ее ИК лучами (например, камфорным или парафиновым маслом). Пленка *4* помещается в сосуд *1* с входным окном *2*, прозрачным для ИК лучей, так, чтобы зачерненная ее сторона была обращена к объективу *5*.

При проектировании ИК изображения фотографируемого объекта на зачерненную сторону пленки *4* отдельные участки пленки будут нагреваться по-разному, в зависимости от интенсивности ИК излучения, падающего на них от той или иной части объекта: там, где ИК излучение более интенсивно, участки пленки *4* нагреваются сильнее. Это приводит к частичному испарению и растеканию вязкой жидкости на другой стороне пленки *4* с более теплых участков на более холодные, в результате чего толщина жидкостного слоя, покрывающего пленку, оказывается неравномерной и распределяется в зависимости от степени нагрева отдельных участков. Это можно обнаружить по изменению цвета участков пленки при освещении ее источником видимого света *6*, создающим интерференционное изображение объекта. Фотографирование его через выходное окно *3* дает тепловое изображение объекта, по которому можно очень точно определить распределение температуры по его поверхности. При помощи этого метода человек может быть сфотографирован в полной темноте на расстоянии 180 м, а здание — на расстоянии 1,6 км.

Эвапорографы имеют следующие примерные типовые значения параметров: время экспозиции при наблюдении объекта с температурой, превышающей температуру окружающей среды на 1 К — около 5—6 с; пороговая чувствительность к разности температур на наблюдаемом объекте около 0,2 К; разрешающая способность — 10—14 штрихов на 1 мм (при разности температур 10 К); возможность повторного экспонирования через 1—2 мин; диаметр мембраны — около 30 мм.

Чувствительность прибора позволяет в зависимости от энергии ИК излучения объекта получать картину с периодом экспозиции (облучения) от долей секунды до нескольких минут, так как нагревание пленки и испарение слоя жидкости требуют определенного времени. Для устранения влияния окружающей температуры на испарение пленки жидкости корпус эвапорографа выполняется из термоизоляционного материала и внутри него устанавливается вакуум

Для «стирания» изображения необходимо при помощи лампы накаливания или нагрева камеры испарить всю пленку жидкости, а затем выждать определенное время для конденсации на пластину нового ее слоя.

Эвапорографы в настоящее время являются единственными ИК приборами, позволяющими прямым путем наблюдать изображения низкотемпературных источников ИК излучения с длинами волн до 15—20 мкм.

В разных странах был разработан целый ряд эвапорографов. Одним из них является отечественный эвапорограф ЭВ-84 (рис. 9) Государственного оптического института им. С. И. Вавилова. Для выделения отдельных участков ИК спектра (3—5; 3—7,5 и 8—11 мкм) и неселективного ослабления лучистого потока в нем применяются специальные фильтры. Эвапорограф снабжен тремя сменными объективами со спектральными рабочими областями 1—19, 2—12 и 2—14 мкм и соответственно с разными фокусными расстояниями и углами поля зрения Эвапорограф сопрягается с фотоаппаратом и кинокамерой. Количественная калиборовка эвапорографа

осуществляется по встроенным в прибор опорным источникам ИК излучения — малогабаритным черным телам с известными яркостными температурами излучения.

Сканирующие ИК камеры составляют другую группу фотокамер для ИК фотографирования. Работа этих камер основана на оптико-механическом сканировании (просмотре) узким полем зрения большой зоны пространства. Сканирующие ИК камеры получили в последнее время широкое распространение и используются для самых различных целей. Приборы эти по своему принципу действия существенно отличаются от обычных фотокамер. Работают они подобно телевизионным установкам, но в основу их принципа

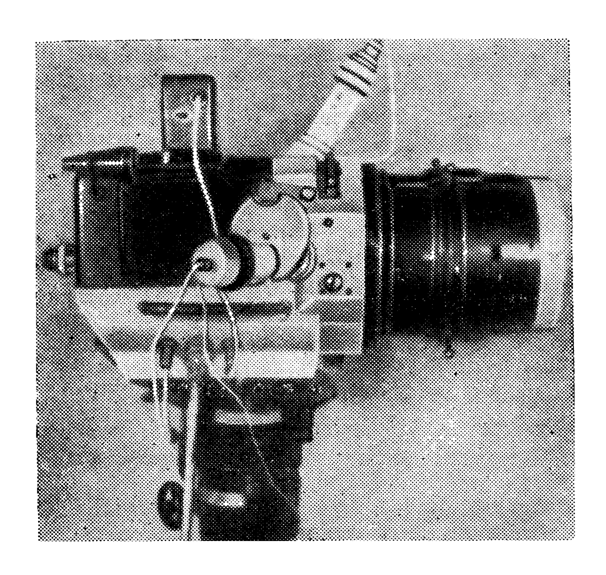


Рис. 9. Эвапорограф ЭВ-84.

действия положен термографический метод, при котором полученное ИК изображение объекта (тепловая картина) создается вследствие отличия температуры отдельных его частей друг от друга, а также от окружающей среды. При этом регистрируется весь ИК спектр излучения, пропускаемый атмосферой и воспринимаемый приемником.

На рис. 10 изображена структурная схема сканирующей ИК камеры. Основными ее элементами являются ИК приемник с усилителем *2*, помещенный в фокусе оптической системы с малым углом зрения *1*, развертывающее устройство (зеркало) *3* для поэлементного обзора большого сектора пространства и регистрирующее устройство *4* для записи интенсивности изображения каждого элемента просматриваемого пространства на фотопленку *5*. Для этого электрические сигналы с выхода усилителя приемника *2* изменяют интенсивность синхронно перемещающегося по фотопленке *5* луча света *6*, что приводит к изменению степени почернения фотоэмульсии. При

подаче сигналов с выхода приемника на приемную электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) на экране последней создается тепловое изображение наблюдаемого объекта. Такой прибор называется **тепловизором** или **термовизором**. Тепловое изображение может быть сфотографировано обычными методами. Для определения интенсивности излучения, принимаемого от фотографируемого объекта, в состав такой сканирующей ИК камеры включается обычно эталонный источник ИК излучения.

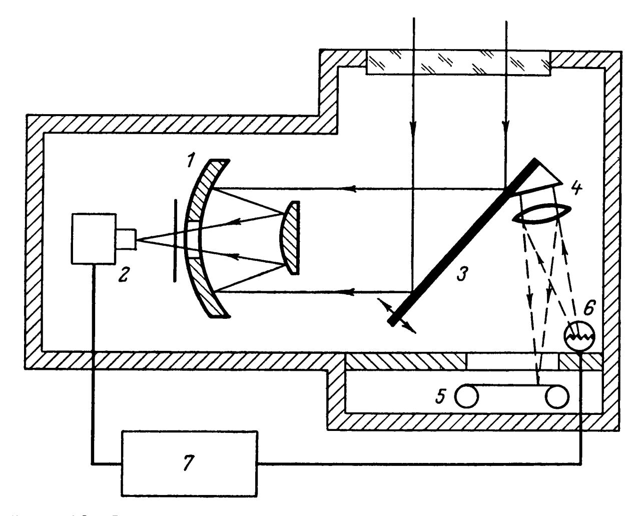


Рис. 10. Сканирующая инфракрасная камера.

1 — зеркально-линзовый объектив; *2* — болометр с предусилителем; *3* — развертывающее зёркало; *4* — система записи; *5* — фотопленка; *6* — источник света; *7* — блок управления.

В настоящее время довольно много сканирующих ИК камер различного назначения выпускается серийно Среди них можно отметить отечественные тепловизоры, разработанные специалистами Государственного оптического института им. С. И. Вавилова, Всесоюзного электротехнического института им. В. И. Ленина и других научных учреждений. За рубежом тепловизоры разрабатываются в Голландии, США, ФРГ и Швеции.

Тепловизор шведской фирмы AGA имеет следующие характеристики: поле обзора — 5×5°, число строк в кадре 100, частота кадров — 16 Гц, оптическое разрешение — около 100 элементов в строке, тепловое разрешение — на уровне 20° С, разрешаются две черные площадки при $\Delta t = 0,2°$ С, уровень температуры объекта — от 30 до 200° С, размер изображения на основном экране тепловизора — 50×60 мм, на дополнительном экране (мониторе для группового просмотра) — 150×180 мм. Приемником ИК излучения в этом тепловизоре является охлаждаемый жидким азотом фотодиод из сурьмянистого индия.

Приборы ночного видения (ПНВ) представляют собой особую группу ИК приборов, расширяющих возможности человеческого

зрения; сюда относятся разнообразные электронно-оптические ИК приборы для наблюдения объектов в ночное время. Приборы ночного видения работают в ближней ИК области спектра. В них производится преобразование ИК излучения объектов в видимое, а также усиление яркости лучистого потока, идущего от объектива к окуляру преобразователя. Приборы ночного видения широко применяются для наблюдения, визирования и прицеливания. Помимо своего прямого назначения ПНВ применяются также для фотографирования в ИК лучах на обычную фотопленку. Структурная схема ПНВ представлена на рис. 11. Основными частями прибора явля-

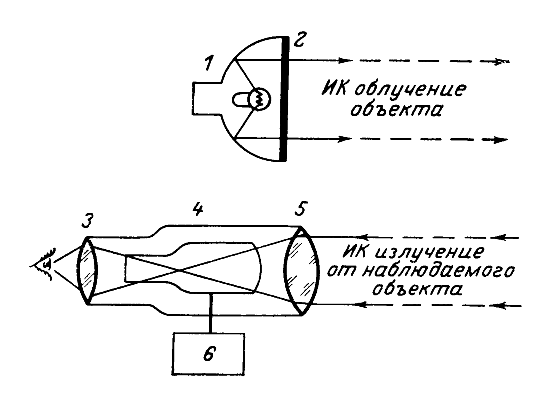


Рис. 11. Схема прибора для наблюдения в ИК лучах.

1 — ИК прожектор; *2* — ИК фильтр; *3* — окуляр; *4* — приемник; *5* — объектив; *6* — блок питания.

ются: ИК телескоп, состоящий из объектива *5*, окуляра *3* и электронно-оптического преобразователя *4* с блоком питания *6* и (если интенсивность собственного ИК излучения объекта недостаточна) ИК осветителя *1* (прожектор или фара) с ИК фильтром *2*, пропускающим излучения с длинами волн 0,8—1,2 мкм (область максимальной чувствительности фотокатода преобразователя). Дальность действия ПНВ (с осветителем) обычно не превышает 1 км. Прибор конструктивно может быть выполнен как бинокулярный (ИК бинокль) или монокулярный, а при необходимости он может быть оформлен в виде перископа.

Ночное видение в ИК лучах осуществляется также телевизионными системами со специальными передающими телевизионными трубками, работающими при низких уровнях освещенности — инфракрасным видиконом и термиконом. Диапазон спектральной чувствительности ИК видикона простирается до волн более 2,1 мкм. Такой видикон используется для получения ИК изображений объектов, нагретых до температуры свыше 150° С. Термикон является ИК преобразователем изображения. Его разрешающая способность составляет около 50 строк на кадр при перепаде температур в 1°.

Теплопеленгаторы предназначаются для определения местоположения объекта по их собственному ИК излучению. Эта большая группа ИК приборов позволяет не только обнаружить объект, но

и определить направление. На рис. 12 приведена типовая структурная схема теплопеленгатора. Инфракрасное излучение *4* от нагретого объекта воспринимается приемной оптической системой *2* (обычно это вогнутое параболическое зеркало) и фокусируется на приемнике *3*. Модуляция поступающего излучения по интенсивности производится при помощи установленного перед приемником механического модулятора, выполненного в виде вращающегося диска с прорезями После усиления в усилителе *5* электрические сигналы от объекта поступают в синхронизатор *6*, определяющий угловые координаты объекта. С выхода синхронизатора сигналы положения объекта поступают в индикаторный блок *8*. Положение (пеленг) объекта может наблюдаться визуально в виде светящейся отметки на экране ЭЛТ, как в радиолокаторе, или фиксироваться в виде цифровых сигналов на табло. Для наблюдения за объектами в определенном секторе пространства оптическая система теплопеленгатора при помощи электропривода *1* сканирует сектор с определенной скоростью.

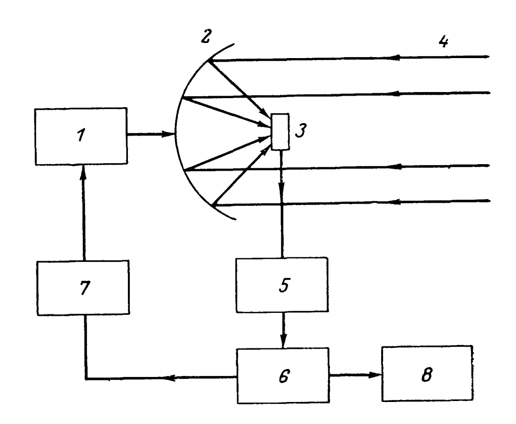


Рис. 12. Структурная схема теплопеленгатора.

1 — электропривод вращения параболического зеркала; *2* — параболическое зеркало; *3* — приемник лучистой энергии с механическим модулятором; *4* — тепловое излучение от нагретого объекта; *5* — усилитель; *6* — синхронизатор; *7* — вычислительное устройство; *8* — индикаторный блок.

Теплопеленгаторы подразделяются на обзорные и обзорно-следящие. Последние осуществляют не только автоматический поиск объекта в заданном секторе обзора, но и обеспечивают автоматическое слежение за объектом при его перемещениях. После обнаружения объекта оптическая система теплопеленгатора при помощи электропривода автоматически наводится на объект и при его перемещениях привод по сигналам синхронизатора поворачивает оптическую систему вслед за объектом, добиваясь устранения рассогласования между осью оптической системы и направлением на объект.

Дальность действия теплопеленгатора зависит от температуры обнаруживаемых объектов, их излучающей поверхности и чувствительности приемника, примененного в приборе. В настоящее время существует целый ряд теплопеленгаторов различного назначения. Основными требованиями к ним являются обеспечение необходимой дальности действия при заданной точности обнаружения и надежность.

К теплопеленгаторам примыкает другая группа ИК приборов — ИК дальномеры, которые служат для измерения расстояний до объектов на местности Дальномеры могут быть построены по активной

и пассивной схемам. Активные ИК дальномеры работают подобно радиолокационным. Они состоят из передатчика с источником ИК излучения, приемного устройства с ИК приемником и индикаторного блока. Дальность до объектов измеряется, как и в радиолокации, импульсным или фазовым методами. В последнее время в этих дальномерах в качестве источника ИК излучения начали применяться светодиоды или ОКГ, которые позволили значительно увеличить дальность действия ИК дальномеров, а также сделать их менее чувствительными к воздействию внешних световых помех (благодаря применению узкополосных ИК фильтров). Точность измерения расстояния у импульсных активных ИК дальномеров достигает 1,5 м.

При пассивном методе измерения расстояние до объекта D определяется при помощи двух теплопеленгаторов *1* и *2* по углам визирования ими объекта α_1 и α_2 и известному расстоянию (базе) b между ними (рис. 13):

$$D = \frac{b \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

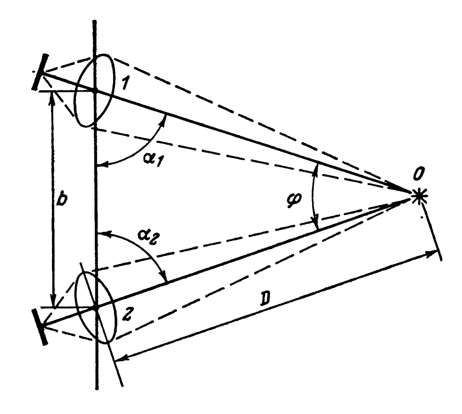


Рис. 13. Схема измерения дальности пассивными ИК дальномерами.

В этом случае большей базе соответствует и большая точность измерения расстояния до объекта.

Для измерения дальности пассивным методом в ночное время могут быть применены также ПНВ с ИК визирами, построенные по типу ночного бинокля.

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Научные исследования были первой областью, где нашли применение методы инфракрасной техники. Сначала появилась ИК спектроскопия. Уже с середины XIX века ИК спектроскопы начали использоваться при лабораторных исследованиях молекулярной структуры веществ и определении органических соединений по их ИК спектрам. Затем ИК приборы начали применяться в астрономии для измерения температуры небесных тел по их ИК излучению. Большую роль они сыграли в исследованиях Солнца. И только в начале XX века некоторые из методов ИК техники начали исполь-

зоваться для решения проблем, связанных с промышленностью, медициной и военным делом.

Сегодня возможности применения методов и приборов ИК техники для научных исследований настолько многообразны, что даже простое перечисление их заняло бы не одну страницу. Поэтому далее излагаются только некоторые, наиболее характерные и интересные области применения ИК техники в науке.

Развитие ядерной физики и практическое использование атомной энергии выявили важность исследования ИК спектров веществ для изучения структуры их атомов и молекул. Молекулы обладают характерным для данного вещества спектром поглощения, состоящим из множества отдельных линий; при этом каждой линии соответствует своя строго определенная для данного вещества колебательная или вращательная частота собственного движения молекул. Было обнаружено также, что спектр сложных соединений (например, органических) почти точно соответствует сумме спектров веществ, входящих в это соединение, так что ИК спектр сложных молекул может состоять из сотен спектральных линий, разделенных очень узкими интервалами, и занимать область шириной до 50 мкм. Были составлены каталоги спектров отдельных элементов и веществ для распознавания наличия их в молекулах сложных соединений и теперь при проведении исследований вместо кропотливого и длительного химического анализа все чаще применяется ИК спектральный анализ состава вещества.

Методами ИК спектроскопии оказалось возможным исследовать состояние атомов и изучать структуру и расположение энергетических уровней в них по положению линий в ИК спектре веществ

В аналитической химии ИК спектроскопия применяется для анализа различных соединений, быстрого определения неизвестного вещества путем сравнения его спектра со спектрами известных веществ по каталогам ИК спектров. Наличие подобных каталогов существенно облегчает ученым проведение качественного анализа вещества. В настоящее время разработана специальная методика ИК анализа веществ с применением перфокарт для ускорения идентификации неизвестных составов.

При количественном анализе химических соединений пользуются тем, что глубина линий поглощения отдельного компонента в ИК спектре соединения пропорциональна его концентрации. Поэтому по сравнению спектра поглощения неизвестного вещества с образцовым можно также определить концентрацию этого вещества в исследуемом соединении. Образцовые спектры поглощения растворов с известной концентрацией данного вещества записываются спектрографами и по ним строятся графики зависимости глубины линий поглощения этого вещества от его содержания в растворе. В физике и химии применяются также радиометрические методы для дистанционного измерения температуры при исследовании различных процессов, контроля степени перегрева атомных реакторов и т. п.

В биологии и медицине методы ИК спектроскопии находят применение при разработке различных химических веществ, изучении изготовленных экстрактов и микстур, исследованиях сывороток, тканей, крови, бактерий и т. п. Облучение ИК лучами широко применяется для лечения заболеваний лимфатической системы, суставных заболеваний и различных травм. Проникая в тело, ИК лучи вызывают нагрев тканей, усиливая при этом активность клеток и обмен-

ные процессы в тканях, что и обусловливает терапевтический эффект лечения.

Большая область применения ИК техники в биологии и медицине при изучении биологических объектов основана на возможности бесконтактного измерения ИК приборами температуры и определения распределения ее по поверхности тела. Инфракрасная аппаратура, способная дистанционно улавливать незначительные температурные аномалии, является серьезным помощником врача при диагностике заболеваний. Аномалии указывают на нарушения в работе внутренних органов, так как кожный покров сравнительно прозрачен для излучения ближнего ИК диапазона волн.

Первые попытки использования термографии в медицине относятся к началу 60-х годов нашего столетия. Было установлено, что каждый квадратный сантиметр человеческой кожи излучает непрерывный поток лучистой энергии. При этом интенсивность излучения, а следовательно, и температура разных участков тела неодинаковы. Они отражают деятельность внутренних органов, расположенных под кожным покровом, и зависят от индивидуального анатомического строения биологического объекта, происходящих в нем в данный момент физиологических процессов. На рис. 14 представлена термограмма лица человека. На ней хорошо видны теплые (светлые) и холодные (темные) участки кожного покрова. Это распределение температуры и его аномалии и интересуют врачей. Еще Гиппократ говорил, что если одна часть тела теплее или холоднее обычного, то она больна. Действительно, по термографической картине ИК излучения тела можно судить о состоянии здоровья пациента, так как больные участки имеют обычно повышенную температуру. Поэтому методы фотографирования в ИК лучах позволяют получить ценную информацию о переломах, вывихах, ушибах, нарушениях кожного покрова, процессах заживления ран, местных воспалениях, границах и глубине ожоговых поражений и обморожений кожных покровов, опухолях, болезнях зубов и других патологических процессах, связанных с температурными аномалиями. Эта информация будет тем более полной, чем ближе к поверхности тела находится поврежденный орган. Здесь находит применение термография.

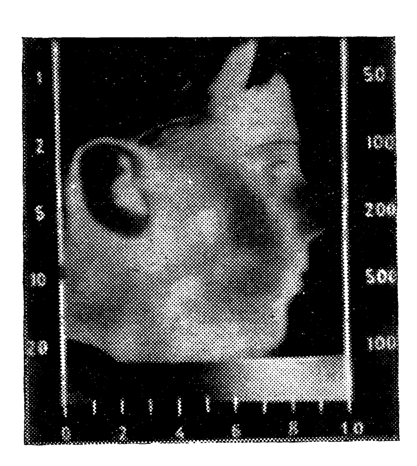


Рис. 14. Термограмма лица человека.

Инфракрасная радиометрическая аппаратура применяется также при электроэнцефалографических исследованиях мозга. В частности, временное повышение температуры головы, связанное, по-видимому, с высокочастотным излучением мозга, позволяет регистрировать эмоции или другой вид умственного напряжения, а также наличие опухолей мозга.

В нашей стране при участии специалистов Государственного оптического института им. С. И. Вавилова был создан ряд тепловизионных и термографических центров в медицинских учреждениях Ленинграда. В Центральной клинической больнице № 1 Министерства путей сообщения организована для аналогичных целей биолокационная лаборатория, оснащенная тепловизорами. Комплексное использование в ней термографии и ультразвуковой биолокации для исследования тканей в значительной степени расширяет диагностические возможности врачей, особенно при выявлении воспалительных заболеваний, нарушениях периферического кровообращения и ряде других болезней.

Специалисты Института скорой помощи им. Джанелидзе в Ленинграде также используют ИК технику при лечении различного вида травм (переломы, раны, ушибы, вывихи), для контроля процессов заживления тканей и раннего обнаружения нарушений периферического кровообращения. В НИИ акушерства и гинекологии исследуется возможность с помощью тепловизоров наблюдать за течением беременности. Этот метод является очень привлекательным благодаря своей полной безвредности для пациентки и плода.

Интенсивно развиваются исследования возможности применения ИК техники для диагностики, клинической оценки и наблюдения за лечением «горячих» опухолей. Они представляют большой интерес для распознавания опухолей на ранней стадии и точного определения границ их распространения. Наиболее удобными для этих исследований являются тепловизоры.

В нашей стране в Институте онкологии имени Н. И. Петрова уже созданы два термографических кабинета, где исследуются сотни больных. На экране тепловизора кожа над опухолью выглядит ярким пятном. С помощью тепловизора можно обнаружить опухоли размерами в несколько миллиметров, чего не позволяет сделать никакой другой метод.

Наиболее успешно тепловизор применяется для раннего выявления рака молочной железы. В Институте онкологии исследуется возможность использования тепловизора для раннего выявления опухолей и предраковых заболеваний молочной железы при профилактических осмотрах.

В физиологии дыхательных путей ИК анализ применяется для определения содержания углекислого газа в выдыхаемом воздухе. Окулисты применяют ИК фотографирование с электронно-оптическим преобразователем для исследования человеческого глаза через непрозрачную роговую оболочку.

Приведенные примеры показывают, сколь ценными могут оказаться методы ИК техники в современной медицине и биологии.

В астрономии ИК техника давно используется при изучении небесных тел. Инфракрасные астрофотографии позволяют получать изображения звезд на фоне туманностей, «холодных» звезд, исследовать поверхность планет. Инфракрасная фотография позволяет осуществлять фотографирование ночного неба вблизи освещенных городов, где обычное фотографирование затруднено из-за рассеянного в атмосфере света.

Радиометрические методы применяются для измерения температур небесных тел. С помощью ИК техники учеными было проведено изучение атмосферы Земли и Солнца. По измерениям полосы поглощения углекислого газа на длине волны 4,3 мкм был получен вертикальный температурный профиль атмосферы до высоты

30 км. В результате исследований, проведенных обсерваториями различных стран, были определены количество и распределение редких компонентов в земной атмосфере. При помощи солнечного ИК телескопа были обнаружены новые линии поглощения в спектре солнечной атмосферы, указывающие на присутствие в ней новых элементов.

Инфракрасные радиометры используются для измерения теплового излучения звезд и планет в диапазонах волн, соответствующих окнам прозрачности земной атмосферы. Проделанные измерения показали, например, что полностью освещенная Солнцем поверхность Луны имеет температуру 120° С, а полностью затененная охлаждается до —150° С и что вообще температуры планет очень различны: от 400° С у Меркурия до —150° С у Сатурна.

Представляют интерес наблюдения Луны в ИК лучах при лунных затмениях. По неравномерностям остывания поверхности Луны под тенью Земли можно разгадать некоторые тайны строения Луны.

Исследования ИК спектров полярных сияний дали новые сведения о магнитном поле Земли.

В метеорологии ИК техника применяется для измерения солнечной постоянной, изучения процессов переноса тепловой энергии в атмосфере для изучения механизма теплового баланса Земли и ее атмосферы, при составлении карт распределения облачного покрова и фронтов атмосферных процессов для составления прогнозов погоды. Установленные на самолетах ИК приборы осуществляют непрерывный контроль содержания водяного пара в атмосфере в районе ураганов. Радиометрические измерения с аэростатов восходящих и нисходящих атмосферных потоков находят все большее применение в микроклиматологии и сельскохозяйственных исследованиях.

В океанографии самолетные ИК радиометры и тепловизоры используются при гидрологических исследованиях для оперативного получения термографических карт океана на больших площадях с целью выявления температурных особенностей водной поверхности и изучения морских течений. Успешно применяются методы термографии для изучения ледовой обстановки в Арктике.

Ученые Арктического и Антарктического НИИ и Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) создали ИК аппаратуру для определения толщины молодых тонких льдов по их собственному ИК излучению. Исследования молодых льдов в Восточной Арктике показали, что аппаратура уверенно различает основные градации молодого льда.

При геофизических и геологических исследованиях Земли методы ИК техники также находят все большее применение. Они позволяют получить более полные сведения о различных зонах земной поверхности, определять расположение природных ресурсов.

Одним из важнейших методов при выполнении исследований такого рода является многоканальная ИК спектроскопия. Она позволяет осуществлять наблюдение объектов одновременно в нескольких спектральных диапазонах. Это вызвано тем, что существуют свои оптимальные спектральные диапазоны для наблюдения различных природных образований.

Здесь широко применяются тепловизоры. При установке на самолете тепловизоры способны выполнить такие исследования и разведку дешевле и быстрее, чем позволяют обычные методы. Эти приборы приносят большую пользу при составлении геологических карт, разведке нефтяных месторождений, изучении загрязненности водое-

мов, обнаружении подземных вод, анализе тепловой эффективности водных источников на электростанциях и оценке земельных ресурсов.

Инфракрасная аэрофотосъемка лесных массивов позволяет выявлять области с больными деревьями по отличию в поглощении и отражении ими ИК излучений, выявлять очаги лесных пожаров.

В сельском хозяйстве ИК методы находят применение для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур по их ИК спектрам, составления каталогов плодородных и обрабатываемых земель и орошаемых площадей. Термографические методы могут применяться для изучения роста растений, контроля за использованием воды в системах орошения (обнаружение потерь воды), а также изучения микроклимата.

В строительстве методы ИК фотографии, дающие возможность выявить наличие подземных вод и мест их выходов, облегчают выбор мест для сооружения предприятий, процесс производства на которых требует большого количества воды.

В вулканологии методы ИК радиометрии используются при изучении деятельности вулканов для получения тепловых карт вулканических процессов, составления схем вулканических зон.

Инфракрасная аэрофотосъемка применялась, например, ленинградскими учеными при изучении извержений вулканов Тятя и Чикурачки на Курильской гряде в 1974 г., для определения температуры в кратерах.

В авиастроении весьма важным является изучение влияния аэродинамического нагрева поверхности летательного аппарата на нагрев всего аппарата. Односторонний нагрев может вызвать опасные изгибы конструкции, искривление несущих поверхностей, повреждение оборудования, отказ двигателей. При исследовании этих явлений применяется моделирование реальных условий с помощью мощных источников ИК излучения. Для этого источники ИК лучей располагаются вблизи соответствующих участков поверхностей и усиливают эффект их нагрева в аэродинамической трубе или имитируют его, если исследования проводятся вне трубы. С помощью ИК кварцевых ламп мощностью 1 кВт каждая можно осуществить нагрев отдельных участков поверхности до температуры 1300—1400°С Для изучения распределения температуры здесь может быть использован эвапорограф или тепловизор.

Инфракрасные приборы (радиометры, пирометры, различные спектрометры) применяются в авиастроении также при разработке реактивных двигателей для исследования теплового режима двигателей, изучения процессов и продуктов сгорания топлива.

В центре европейской организации по исследованию космоса в Голландии тепловизоры применяются для анализа моделей спутников и кабин космических кораблей в условиях полета. Объективным температурным испытаниям подвергались иллюминаторы, солнечные батареи, поверхности корпусов космических аппаратов, сварные швы.

При археологических исследованиях ИК фотографирование применяется для изучения древней настенной живописи, исследованиях ее структуры и особенностей, так как некоторые краски оказываются прозрачными для ИК лучей. В музееведении исследование старых картин методами ИК фотографирования дает возможность устанавливать их подлинность, а также выявлять скрытую под последующими слоями красок или лаков первоначальную живопись. Этим способом, например, были обнаружены в картине, приписываемой Веласкесу, пигменты, никогда не применявшиеся им.

Фотографирование в ИК лучах помогло специалистам установить, что картина «У ростовщика» принадлежит кисти французского художника Латура. В СССР это единственное произведение Латура. Картина была выставлена во Львовской картинной галерее и долгие годы считалось, что ее автором является голландский художник Хонтхорст.

Интересным является применение ИК техники, в частности ИК фотографирования, в палеонтологии и палеоботанике при исследованиях окаменевших останков насекомых и растений. Среда, в которой они заключены, обычно непрозрачна для видимых лучей и только на ИК фотографиях представляется возможным получить изображение исследуемых объектов в мельчайших подробностях.

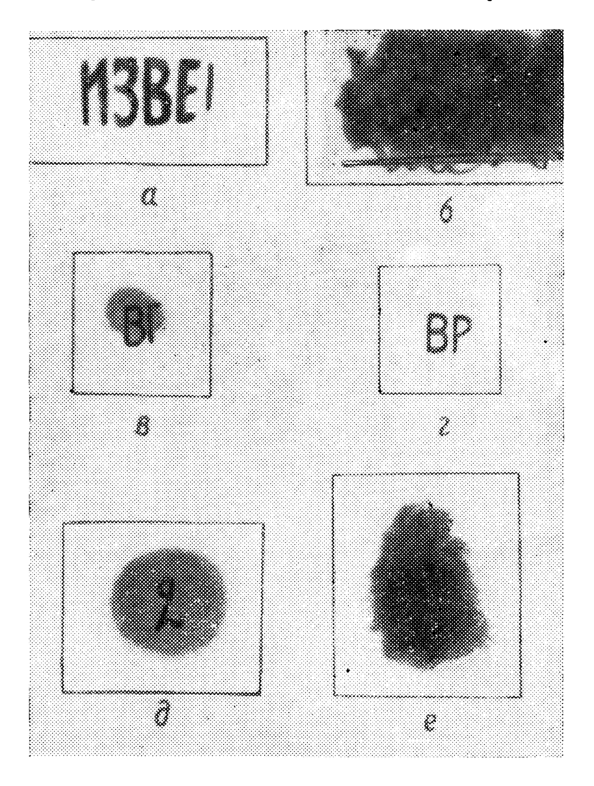


Рис. 15. Снимки документов в видимых (*б*, *г*, *е*) и инфракрасных (*а*, *в*, *д*) лучах.

В криминологических исследованиях ИК спектральный анализ используется для обнаружения следов алкоголя в выдыхаемом воздухе, идентификации и сличения наркотиков и ядов, лоскутков одежды, пятен и т. п. По результатам ИК спектрального анализа возможно даже установить место производства данного наркотика, так

как его состав несколько различен в зависимости от местонахождения плантации.

Различие значений коэффициентов отражения в видимом и ИК диапазонах у различных красок и чернил делает возможным при помощи фотографирования в ИК лучах отличать подделку от оригиналов, восстановить старые или залитые чернилами и краской надписи, изображения и тексты, обнаружить невидимые глазом отпечатки пальцев, выявлять пятна крови на темных материях, уничтоженную татуировку и т. п. На рис. 15 изображены снимки документов, сделанные в видимых и ИК лучах с применением электронно-оптического преобразователя. Поскольку чернила прозрачны для ИК лучей, скрытый под чернилами текст и исправление букв ясно видны на ИК фотографиях. Этот метод позволяет иногда прочесть текст даже на обгоревших документах.

Приведенными примерами далеко не исчерпывается применение ИК техники в научных исследованиях В наше время научные открытия находят практическое применение очень быстро и новые ИК приборы незамедлительно приходят на помощь ученым в исследованиях, расширяя их возможности.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Инфракрасный спектр занимает промежуточное положение между видимым (оптическим) излучением и радиоволнами, поэтому ИК излучения обладают свойствами, присущими как видимому, так и радиоизлучению. В целом ряде практических применений эта двойственность свойств ИК излучений оказывается весьма полезной. ИК аппаратура находит применение чаще всего там, где визуальные (оптические) методы являются неприемлемыми или где радиоаппаратура является недостаточно точной.

В современной ИК аппаратуре достаточно просто достигаются быстродействие и высокая точность измерений, возможность дистанционного изучения объектов без их повреждения и детального анализа вещества по весьма малому его количеству. Все это делает ИК приборы незаменимыми в современной науке и технике. В настоящее время они успешно используются в народном хозяйстве для самых различных целей: выполнения химического и биологического анализа, контроля качества изделий, автоматического управления различными процессами производства, для целей навигации, связи и т. д. В настоящей главе будет рассказано о некоторых основных областях применения ИК техники в народном хозяйстве.

Спектроскопические исследования имеют целью выявить состав и структуру вещества посредством изучения результатов воздействия на это вещество электромагнитного излучения. Такие исследования являются весьма эффективным орудием для проведения качественного и количественного химического анализа веществ, изучения структуры молекул твердых тел, жидкостей и газов.

Методы ИК спектроскопии первоначально нашли применение в заводских лабораториях для быстрого и точного анализа продуктов производства и непрерывного контроля производства на различных стадиях. Создание высококачественных ИК приемников и оптических материалов привело к разработкам целого ряда спектральных ИК приборов для народного хозяйства. В настоящее время инфракрасная спектроскопия превратилась в самостоятельную область знаний, необходимую для решения многих вопросов в нау-

ке и технике, и по праву может считаться наиболее важной и развитой частью ИК техники.

Применение методов ИК спектроскопии основано на том, что инфракрасные спектры поглощения и излучения любого вещества имеют вполне определенный вид и поэтому являются характеристикой этого вещества. Следовательно, по виду ИК спектра поглощения можно определить, какое это химическое соединение (произвести его качественный анализ), а по интенсивности полос поглощения ИК излучения веществом — концентрацию вещества (произвести его количественный анализ). Оба эти вида химического анализа могут быть выполнены и эмиссионным методом по спектру излучения вещества. Для этого небольшое количество исследуемого вещества сжигается (в искре, в электрической дуге или испаряется лазерным лучом) с одновременным фотографированием спектра его ИК излучения.

Прежде всего ИК спектральный анализ начал применяться в *химической промышленности:* спектральные ИК приборы используются здесь для точного и оперативного химического анализа сложных органических соединений, обнаружения и идентификации в них различных примесей, слежения за протеканием химических реакций, контроля состава промежуточных продуктов производства и тому подобных операций, обеспечивающих непрерывный контроль производства на всех его стадиях и повышение качества выпускаемой продукции.

Подобные задачи методы ИК спектроскопии решают и в других отраслях промышленности. Так, в *нефтяной промышленности* ИК спектральные приборы применяются в течение многих лет как надежное средство для оценки количественного состава нефти, определения содержания в ней различных примесей, определения октанового числа бензина, контроля состава смазочных материалов. Инфракрасные спектрофотометры используются также для быстрого анализа грунтовых вод с целью определения наличия в них следов нефти. Чувствительность этого метода такова, что им можно обнаружить одну частицу примеси на миллиард частиц воды.

Методы ИК спектроскопии являются неоценимым средством анализа *в фармацевтической промышленности* при производстве лекарств, где высокая точность анализа и правильная идентификация небольших количеств различных веществ особенно важны. Большинство фармацевтических и биохимических препаратов изготовляются из дорогих концентратов или путем сложных химических процессов так, что разработка и производство лекарств зачастую являются длительным и дорогостоящим процессом. Применение здесь ИК спектроскопии дает по сравнению с обычными методами химического анализа большую точность и более надежную отбраковку при меньших затратах времени, особенно при контроле производства и анализе сходных лекарств.

В косметической и парфюмерной промышленности методы ИК спектроскопии дают возможность осуществить быстрое и надежное сравнение состава очень небольших по размеру и часто дорогих образцов, не разрушая их в процессе анализа. Инфракрасные спектрометры и микроскопы позволяют выявить свойства неизвестных веществ, а также изучить их структуру. При обнаружении различных примесей вещество подвергается очистке под контролем ИК спектральных приборов. Неточности и ошибки, возникшие при составлении смесей различных веществ, могут быть выявлены путем сравнения ИК спектров изготавливаемой и эталонной смеси на ИК

спектрофотометре. Одной из важных проблем в парфюмерной промышленности является также анализ пахучих веществ и изучение их состава. Применение для этих целей обычных методов химического анализа связано с большой затратой времени, а иногда является вообще невозможным. Задачи эти очень просто и оперативно решаются методами ИК спектрального анализа. При помощи ИК спектральных приборов может быть очень быстро выполнен анализ смесей ароматических веществ, определено качество исходных продуктов без повреждения дорогостоящих образцов, а также осуществлен контроль качества выпускаемой продукции.

В лакокрасочной промышленности ИК спектральные приборы применяются для выполнения стандартных анализов и в целях улучшения качества красок и покрытий, при разработках новых материалов, для контроля качества производства красок, лаков, олифы и другой продукции. По ИК спектрам могут быть определены составы красок для одежды, отражающие солнце и сохраняющие прохладу летом.

В пластмассовой промышленности ИК спектральный анализ применяется для химического анализа пластмасс путем сравнения на спектрофотометрах спектров исследуемых веществ со спектрами образцов и исходных материалов, играющими при сравнении роль эталонов.

В пищевой промышленности методы ИК спектроскопии также находят применение для контроля изготовления и качества различных готовых продуктов. С помощью ИК спектрографов может быть, например, произведен анализ различных углеводородов, витаминов, кислот, масел, жиров, ферментов и белка в пищевых продуктах, анализ дрожжей и сахара. Эти приборы можно также использовать для обнаружения следов сельскохозяйственных ядохимикатов на фруктах и овощах и других продуктах.

В молочном производстве ИК спектральные приборы находят применение для контроля жирности молока и содержания воды в масле, контроля продуктов, в процессе производства сухого молока.

В табачной промышленности ИК приборы также служат для контроля качества при производстве продукции. Они позволяют быстро определить, например, концентрации различных фракций в табачном дыме, исследовать наличие различных компонентов в табаке и пр.

В сельском хозяйстве эмиссионный метод ИК анализа находит применение для определения химического состава почв, наличия в почве и растениях необходимых питательных веществ. Это позволяет оценить степень плодородия почвы и на основе результатов анализа применить необходимые агротехнические мероприятия. Методами пассивной ИК спектроскопии производятся также анализ различных удобрений и ядохимикатов и контроль качества зерна.

Одна американская фирма разработала ИК прибор, при помощи которого примерно за 40 с определяется с точностью 0,2% содержание воды, белка и масла в зерне. Прибор регистрирует отраженные от пробы зерна ИК лучи и автоматически выдает данные о процентном содержании в зерне этих компонентов.

Облучение ИК лучами стимулирует рост и жизнедеятельность живых организмов и растений.

В Волгоградском сельскохозяйственном институте разработана электрическая машина «ЭМПОС» для предпосевной обработки семян в ИК лучах для повышения их всхожести. Там же создан

прибор «ИКУФ», подобный передвижному подвесному светильнику Он предназначен для облучения новорожденных телят инфракрасными и ультрафиолетовыми лучами. Включается прибор периодически по заданной программе. Он стимулирует жизнедеятельность организма телят. В результате его применения на ферме не стало случаев падежа телят

В цементной промышленности эмиссионный метод ИК спектроскопии позволяет производить быстрое определение содержания щелочи в составе цемента. Проведение такой оценки методами обычного химического анализа занимает около двух дней; с помощью ИК спектральных приборов эта операция может быть выполнена за несколько минут, причем может осуществляться и непрерывный контроль содержания щелочи в процессе производства цемента.

В угольной промышленности спектральная ИК аппаратура находит применение для изучения состава и структурных особенностей углей, определения наличия в них различных групп химических соединений.

В полиграфической промышленности приборы ИК спектрального анализа позволяют осуществить отбор и качественный контроль исходных материалов и оттисков для печати. При помощи спектрофотометров производится быстрая классификация масел, естественных красок и их смесей путем сравнения их ИК спектров поглощения со спектрами известных материалов. Наличие примесей в спирте обнаруживается при ИК анализе гораздо быстрее, чем при обычном химическом анализе методом титрирования Это выполняется путем измерения интенсивности полос поглощения в ИК спектре проверяемого спирта

В атомной промышленности применение ИК спектроскопии при производстве тяжелой воды позволяет контролировать содержание в ней дейтерия. С помощью ИК спектральных приборов производится исследование продуктов разложения органических веществ радиоактивным излучением. Эти приборы применяются также для изучения влияния радиоактивного излучения на продукты питания, краски, защитные покрытия, смазки, на различные материалы и сплавы.

В ИК приборостроении спектральные методы применяются для определения характеристик пропускания и поглощения ИК излучений различными материалами, фильтрами, оптическими системами Знание этих характеристик необходимо для правильного проектирования ИК аппаратуры и оценки ее технических возможностей

Инфракрасная спектроскопия применяется также для снятия спектральных характеристик различных источников и приемников ИК излучения. Знание спектральных характеристик приемников и источников ИК излучения является необходимым условием для качественной и количественной оценки их взаимодействия при разработке и эксплуатации ИК аппаратуры.

Возросшее значение чистоты воздуха в жилых и промышленных районах привело к широкому применению средств ИК анализа для быстрого, экономичного и надежного *количественного анализа загрязняющих веществ в пробах воздуха.* Средствами ИК анализа измеряется и контролируется содержание в воздухе веществ, выбрасываемых в атмосферу промышленными предприятиями, выхлопных газов, продуктов сгорания органических соединений, обнаруживается утечка газов в трубопроводах.

По ИК спектрам отражения ювелиры могут производить идентификацию драгоценных камней и выявлять поддельные камни.

Сравнительно высокая проникающая способность ИК излучения в материалы используется в промышленности *для нагрева деталей, сушки красок и древесины.* Это позволяет ускорить технологический процесс и улучшить качество изделий. Эффективность применения ИК излучения для нагрева и сушки зависит от правильности сочетания оптических свойств излучателя и облучаемого материала.

В технике точных измерений широко используются методы ИК радиометрии. Инфракрасные радиометры и радиационные пирометры различных типов находят применение в технике точного анализа для дистанционных измерений интенсивности ИК излучений и температуры нагрева поверхности предметов. По получаемой при помощи этих приборов тепловой картине можно определить свойства изделий и их слабые места, осуществлять непрерывный контроль производственного процесса Так, например, применение радиационного пирометра для контроля температуры нагрева бумаги на высокоскоростных печатных прессах дает возможность применить ускоренную сушку типографской краски в процессе печати. На железнодорожном транспорте эти приборы позволяют быстро обнаружить перегрев вагонных букс и осей, в металлообрабатывающей промышленности они используются для контроля температуры деталей при индукционном и диэлектрическом нагреве, режущего инструмента и т. п. Это дает возможность управлять такими технологическими процессами, как пайка, сварка, сушка, горячая вулканизация, склейка, окраска различных изделий, а также многими другими процессами, требующими контроля и регулировки теплового режима.

Приборы ИК фотографии используются для быстрого получения картины распределения температуры по поверхности тела, обнаружения на ней перегретых мест, перегрузок в электрических цепях и т. п. На ИК фотоснимке (термограмме) оптическая плотность потемнения различных участков зависит от распределения температуры на фотографируемой поверхности. При этом более теплые участки выглядят белыми или более светлыми, чем фон, а холодные — темными. Для определения истинной температуры участков объектов одновременно делается снимок образцовой температурной шкалы. На рис. 16 представлена ИК фотография автомашины, на которой хорошо видны более нагретые части: двигатель, выхлопная труба, колеса и др.

Особенно удобными для получения термограмм являются сканирующие радиометры — тепловизоры, которые способны обнаруживать местные тепловые контрасты в десятые и даже сотые доли градуса, что позволяет быстро решать проблемы, являвшиеся ранее трудноразрешимыми. Так, например, применение на заводе «Электросила» для проверки статоров электродвигателей небольшого тепловизора позволило регистрировать температурные аномалии с точностью до 0,1° С. С помощью подобных ИК приборов можно по местным перегревам обнаруживать дефекты в крупных металлических отливках, находить места неисправностей в двигателях, генераторах, насосах, облицовке доменных и мартеновских печей.

За рубежом тепловизоры применяются для наблюдения за металлообрабатывающими агрегатами, трансформаторными подстанциями, проводами высокого напряжения и помогают выявлять зоны опасного перегрева для предотвращения аварий. При разме-

щении тепловизора на вертолете (или на тележке) с его помощью можно следить за состоянием городской водопроводной системы, нефтепроводов, дренажных систем. При помощи тепловизора, установленного на самолете, можно наблюдать океанские течения, находить косяки рыбы, обнаруживать незаметные на глаз занесенные снегом трещины во льду, определять созревание хлебов, состав и структуру почв и т. п. Благодаря тому, что ИК лучи лучше, чем видимые, проходят сквозь дымку, ИК фотографирование широко применяется при картографировании и воздушной разведке земной поверхности.

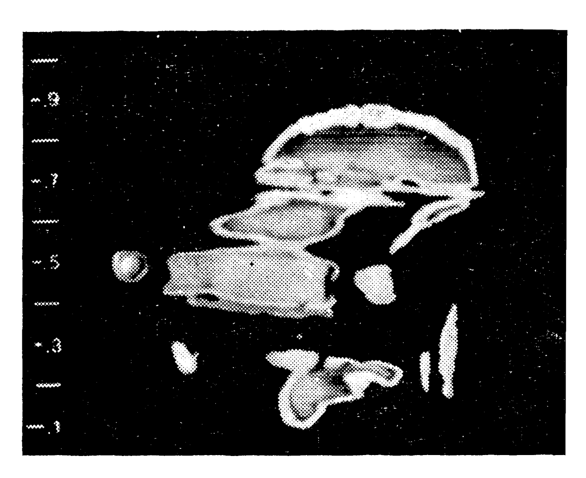


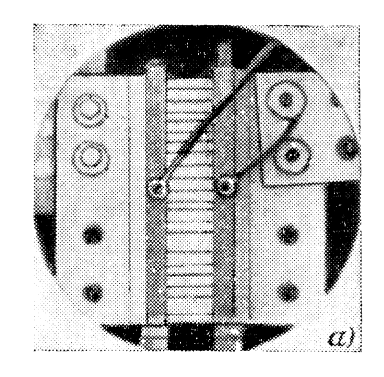
Рис. 16. Термограмма автомобиля.

Тепловизоры и эвапорографы начинают применяться для изучения теплового режима электрических схем. Не нарушая условий работы схемы, они автоматически дают сведения о тепловом режиме, источниках нагрева в схеме. На рис. 17 показаны эвапорограмма и обычная фотография мощного нагретого шунта, а на рис. 18 термограмма и обычная фотография мощного транзистора. Белые области на термограммах соответствуют наиболее горячим участкам.

Термографическими методами возможно заранее определить на схемах элементы, которые могут выйти из строя, и заблаговременно заменить их.

Приборы ночного видения совместно с ИК осветителями применяются в фото- и кинопромышленности для контроля фотографических процессов при обработке негативных фотоматериалов. Они могут быть также использованы для наблюдения за любыми производственными процессами, при которых является нежелательным наличие освещения.

Приборы ночного видения применяются для наблюдения и визирования на местности различных объектов по их тепловым контрастам. Специалисты проводят опыты по применению ПНВ (и других ИК приборов) для поиска косяков рыбы в открытом море. Из ПНВ наибольшее распространение получили ИК бинокли. Они



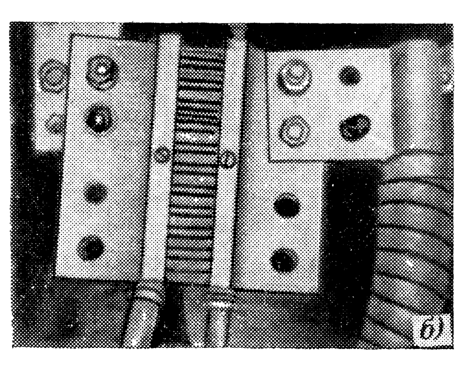
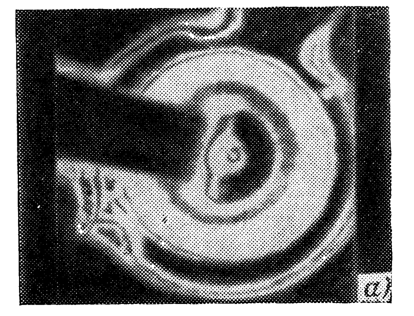


Рис. 17. Изображение нагретого шунта.
а — эвапорограмма; *б* — обычная фотография.



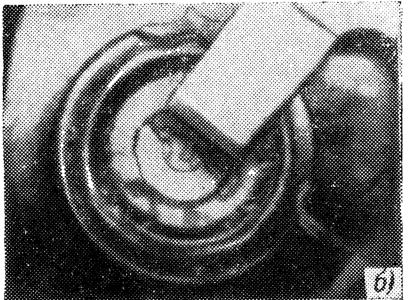


Рис. 18. Термограмма (*а*) и обычная микрофотография (*б*) транзистора.

применяются в тех случаях, когда возможности человеческого зрения оказываются ограниченными вследствие плохого освещения местности естественными источниками в вечернее и ночное время.

Нашлемные ИК бинокли (рис. 19) в сочетании с ИК фарой обеспечивают вождение транспортных средств в ночных условиях при низкой освещенности местности. На рис. 20 показан общий вид такого ПНВ для вождения автомобилей.

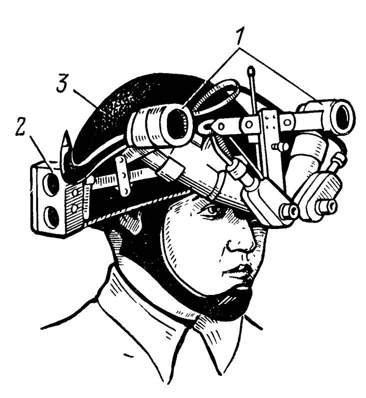


Рис. 19. Нашлемный ИК прибор для вождения автомобилей.
1 — ИК бинокль; 2 — источник питания; 3 — шлем.

В системах навигации кораблей и самолетов ИК приборы применяются для движения по заданному маршруту. Наиболее простым методом является вождение кораблей по фарватеру при помощи створных ИК маяков (мощных ИК осветителей) с направленным ИК излучением, которые устанавливаются в соответствующих местах на берегу. Дальность действия такого маяка может достигать 10 км. При этом на корабле должен быть установлен какой-нибудь наблюдательный прибор с электронно-оптическим преобразователем (ИК телескоп). Для обеспечения безопасности движения корабля в открытом море в его носовой части может быть установлена активная ИК система, состоящая из вращающихся синхронно ИК прожектора и обзорного теплопеленгатора. При появлении по курсу корабля какого-либо препятствия (например, айсберга) теплопелен-

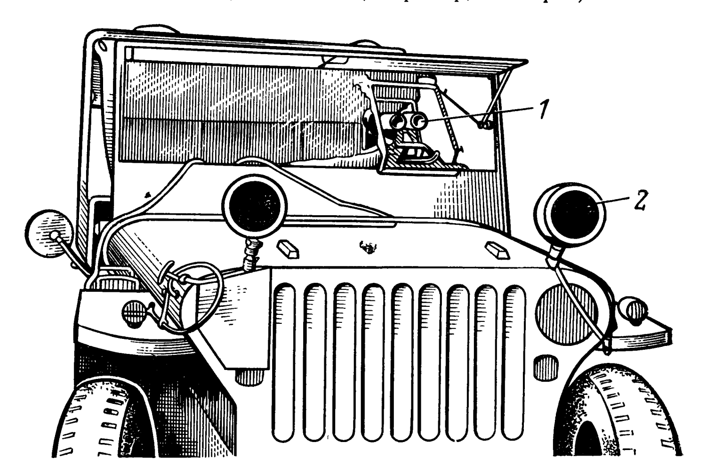


Рис. 20. Общий вид приборов ночного видения для вождения автомобилей.
1 — ИК визир; 2 — фара, закрытая ИК фильтром.

гатор обнаруживает и запеленговывает его по отраженному излучению ИК прожектора.

В самолетных навигационных системах обзорные теплопеленгаторы применяются для непрерывного контроля курса при полетах ночью или в условиях плохой видимости по трассе, оборудованной ИК маяками. С помощью такого теплопеленгатора производится просмотр местности впереди самолета и по сигналам ИК маяков определяется направление полета. При помощи теплопеленгатора в условиях плохой видимости может быть произведена «слепая» (по приборам) посадка самолета. Для этого ИК маяки должны быть установлены вдоль взлетно-посадочной полосы. Дальность действия ИК маяков можно повысить, применяя параболические отражатели ИК лучей. При ширине луча около 20 угловых минут дальность действия маяка может достигать 2 км.

Безопасность полетов самолетов гражданской авиации может быть повышена при установке на самолете обзорного теплопеленгатора с большим углом обзора пространства в передней полусфере самолета. Этот прибор сигнализирует летчику о приближении встречного самолета и дает ему возможность совершить необходимый маневр, чтобы предотвратить столкновение. Дальность действия такой системы предупреждения увеличивается при установке на самолетах ИК маяков: эксперименты показали, что в этом случае дальность обнаружения встречного самолета может достигать почти 10 км днем и 15 км ночью.

Теплопеленгаторы в авиации применяются также для обнаружения турбулентностей чистого воздуха в атмосфере. Имеются многочисленные сведения о повреждениях и даже авариях самолетов из-за попадания в область турбулентности, поэтому своевременное обнаружение турбулентной области на пути самолета очень важно. Такие области обычно встречаются в узких слоях воздуха, имеющих несколько более высокую температуру, и их легко обнаружить ИК приборами.

Теплопеленгаторы используются в комбинированных ИК-лазерных системах для точного наведения узкого луча лазера на визируемый объект. Например, такой теплопеленгатор входит в состав американского оптического локатора OPDAR, предназначенного для точного слежения за самолетами и ракетами на активном участке полета. Теплопеленгатор этого локатора имеет телескоп диаметром 100 мм с углом поля зрения в 4° и обеспечивает измерение угловых координат с точностью, равной ±0,92 угловой секунды. В другом американском оптическом локаторе, предназначенном для слежения за быстро перемещающимися воздушными объектами, был применен теплопеленгатор, следящий за объектом по установленному на нем ИК маяку, излучающему в диапазоне волн 0,85—1,15 мкм. В этом теплопеленгаторе использовался телескоп с зеркалом диаметром 200 мм, выполненный по схеме Кассегрена. Он осуществлял точное наведение луча лазера на объект со статической ошибкой, не превышающей 10 угловых секунд. Динамическая ошибка слежения по обеим осям составляла при этом 50 угловых секунд.

При проведении различных геодезических работ, картографической съемке местности, постройке инженерных сооружений и решении целого ряда прочих технических задач применяются активные и пассивные ИК дальномеры.

Применение ИК лучей для связи стало возможным благодаря успехам современной радиотехнической и оптико-механической промышленности. Связь на ИК лучах может осуществляться только

в пределах прямой видимости между абонентами. Благодаря тому что луч передатчика очень узок (доли градуса) и рассеяние энергии невелико, для установления связи требуется сравнительно небольшая мощность ИК излучения. Дальность действия телефонной и телеграфной связи в ИК диапазоне волн зависит от прозрачности атмосферы, мощности источника ИК излучения, диаметра приемного объектива и чувствительности приемника. В прозрачной атмосфере, дымках и легком тумане ИК излучение с длиной волны менее 1,5 мкм, обычно применяемое для целей связи, распространяется гораздо лучше видимых лучей. При хорошей прозрачности атмосферы дальность ИК связи может достигать 15—20 км.

Приборы для связи на ИК лучах имеют сравнительно несложную конструкцию, небольшую массу и малые габариты. В качестве источника ИК излучения в них могут применяться некогерентные

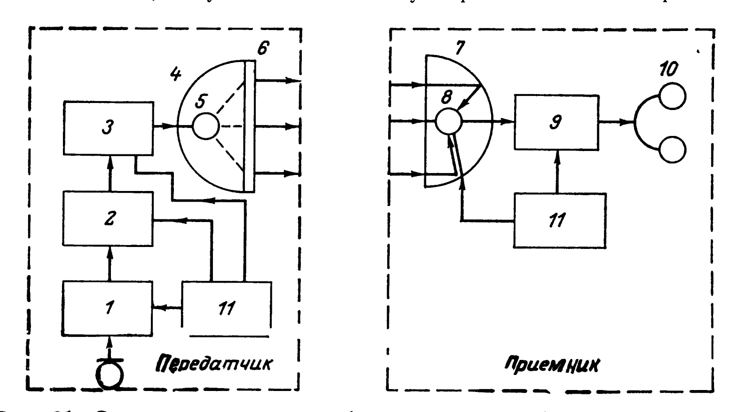


Рис. 21. Структурная схема инфракрасного телефона.

1 — предусилитель; *2* — усилитель; *3* — модулятор; *4* — отражатель излучателя; *5* — излучатель; *6* — ИК фильтр; *7* — оптическая система приемника; *8* — приемник; *9* — усилитель низкой частоты; *10* — телефон; *11* — блок питания.

излучатели (лампа накаливания, электрическая дуга, светодиод) с ИК фильтрами или источники когерентного излучения — лазеры ИК диапазона волн. Лазерные линии связи ИК диапазона волн начали развиваться недавно, после появления оптических квантовых генераторов этого диапазона.

С появлением чувствительных ИК приемников было создано много систем ИК телефонов, различавшихся, главным образом, способом модуляции лучистого потока.

Инфракрасный телефон (рис. 21) состоит из передатчика, приемника и блока питания. Передатчик и приемник обычно конструктивно объединяются в один прибор. Передатчик включает в себя источник ИК лучей *5*, оптическую систему *4*, *6* для формирования ИК излучения в пучок с малой расходимостью, модулятор *3*, микрофон с предусилителем *1*, усилитель микрофонных токов *2*. В состав приемника входят приемная оптическая система *7*, ИК приемник *8*, преобразующий принятое ИК излучение в электрический ток, усилитель *9* и телефон *10*.

Связь на ИК лучах может эффективно применяться между кораблями и берегом, между изолированными друг от друга пунк-

тами в условиях горной и труднопроходимой местности и, вообще, в тех случаях, когда расстояние прямой видимости достаточно велико, а связь по проводам или применение обычных радиотехнических средств связи по каким-либо причинам нежелательны.

На рис. 22 представлен немецкий ИК телефон ЛИ 250/130. В его передатчике в качестве источника ИК лучей применена обычная лампа накаливания с ИК фильтром, а в приемнике — сернисто-свинцовый фоторезистор с эффективной площадью 1 мм². Этот телефон в зависимости от мощности лампы передатчика обеспечивает дальность связи от 3 до 16 км, расходимость пучка ИК излучения составляет 0,8°.

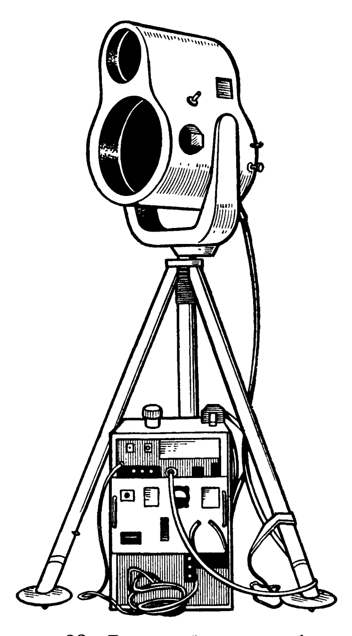


Рис. 22. Внешний вид инфракрасного телефона ЛИ 250/130.

В ИК телеграфе **в цепь питания** ИК передатчика включается телеграфный ключ, обеспечивающий кодирование (манипуляцию интенсивности) излучения сигналов в соответствии с азбукой Морзе. Приемная часть телеграфа представляет собой обычный преобразователь ИК излучения в видимое (электронно-оптический преобразователь или ПНВ). На его экране можно наблюдать яркостные отметки с различной длительностью свечения, воспроизводящие передаваемые телеграфные знаки. В условиях прямой видимости на открытой местности возможно осуществление ИК телеграфной связи на расстояние до 10 км. Недостатком этого вида связи является большая длительность передачи и приема сообщений, ограниченная возможность связи на пересеченной местности, в условиях перемещения передатчика или приемника и т. п. Телеграфная связь на ИК лучах применялась вначале на флоте, а затем как средство сигнализации в ИК маяках, где излучение с помощью специального устройства модулируется в соответствии с азбукой Морзе. Сигналы ИК маяка наблюдаются на кораблях с помощью различных ИК индикаторов.

Инфракрасные приборы могут применяться в системах управления движением и охраны объектов для так называемой оптической блокировки — регистрации появления движущихся объектов. Эти системы могут быть как активными, так и пассивными. Действие пассивных систем блокировки основано на регистрации разности интенсивностей ИК излучения появляющихся объектов и окружающего фона, а активных — на регистрации факта пересечения объектом узкого пучка ИК лучей, направленных источником на приемник (рис 23) Во избежание влияния посторонних излучений на работу аппаратуры блокировки излучение их источников модулирует-

ся частотой 5—10 кГц. Этим, кроме того, упрощается усиление принятого сигнала и устраняется опасность световой перегрузки фотоприемника. С выхода приемника сигнал подается на сигнальный прибор.

Подобные системы блокировки могут использоваться для контроля движения на перекрестках дорог, у входа в гавань и на узостях речных фарватеров, при охране важных объектов, когда

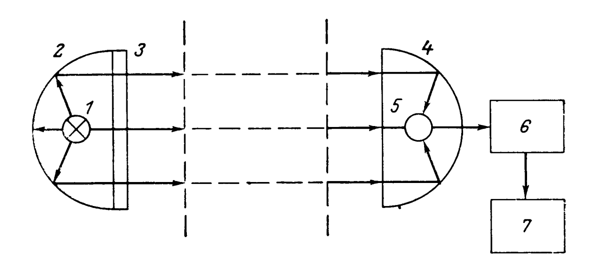


Рис. 23. Структурная схема оптической блокировки.
1 — источник ИКЛ; *2* — зеркало; *3* — ИК фильтр; *4* — оптическая система приемника; *5* — фотоприемник; *6* — усилитель; *7* — сигнальный прибор.

визуальное наблюдение по каким-либо причинам затруднено. Дальность действия их невелика. Так, например, французская система блокировки Л-80 в плохих метеоусловиях имеет дальность действия 500 м.

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА В ИЗУЧЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Новая эра в изучении космического пространства, начавшаяся после запуска первого в мире искусственного спутника Земли (ИСЗ), созданного в нашей стране, связана со значительными достижениями науки, техники и промышленности. Изучение космоса потребовало нового подхода к вопросам навигации, наведения и связи. К космической аппаратуре предъявляются повышенные требования в отношении точности и надежности работы. Особенно важную роль играют потребление, масса и объем аппаратуры.

Изучение космического пространства невозможно без применения разнообразной радиотехнической, электронной, оптической и другой аппаратуры. Эта аппаратура является основным средством, обеспечивающим выполнение программ космических полетов. Она выполняет здесь следующие основные функции: слежение и управление, научные исследования и связь.

Системы слежения и управления устанавливают оптимальную для полета траекторию, фиксируют любое от нее отклонение, вырабатывают команды, необходимые для ее корректировки, и поддерживают заданный режим для систем космического аппарата (КА). Научная аппаратура выполняет основные задачи космического полета — расширение наших знаний о космосе. Практически вся информация о космосе получается с помощью электронных и оптических устройств и получившей в последнее время большое рас-

пространение оптико-электронной и, в частности, инфракрасной аппаратуры.

Средства ИК техники, в которых нашли применение новейшие достижения оптики и полупроводниковой электроники, характеризуются высокой точностью и разрешающей способностью в широком спектральном диапазоне и малыми габаритами. Кроме того, ИК приборы позволяют проводить дистанционные исследования. Поэтому они находят все большее применение в изучении Вселенной; к тому же условия для работы ИК приборов в космосе лучше, чем на Земле. Это обусловлено практически полным отсутствием поглощения ИК излучения при распространении, а также крайне низким уровнем фоновых шумов, поскольку здесь отсутствует излучающая среда. Фоновые шумы в космосе создаются практически лишь слабым излучением звездного неба при условии, что в поле зрения прибора не попадает излучение ярких звезд. Поэтому дальность действия ИК приборов в космосе значительно больше, чем на Земле.

В космосе перед ИК техникой открылся целый ряд новых областей применения. К ним следует отнести космическую навигацию, исследования атмосферы и поверхности Земли и планет из космического пространства, различные астрономические и астрофизические исследования и космическую связь. Увеличивающиеся масштабы изучения Вселенной и наличие в космическом пространстве благоприятных условий для работы ИК приборов способствуют увеличению удельного веса ИК устройств в составе оборудования различных космических аппаратов (искусственных спутников Земли, космических кораблей и автоматических межпланетных станций). Это объясняется тем, что специфика ИК приборов позволяет решать с их помощью многие задачи технически проще, чем иными видами техники.

Космическая навигация при полете КА решает следующие основные задачи: определение положения и ориентация КА в пространстве, управление его движением в процессе полета для выведения к месту назначения. Система ориентации представляет собой систему автоматического регулирования положения корабля в выбранной системе координат. Она входит в систему управления КА, придает ему определенное положение в пространстве и удерживает его в этом положении в течение необходимого времени.

Ориентация и стабилизация положения КА требуются также для обеспечения нормальной работы бортовой аппаратуры. Так, например, применение систем пространственной ориентации и стабилизации положения советской автоматической межпланетной станции (АМС) «Луна-3» позволило осуществить с ее борта фотографирование обратной стороны Луны. На АМС, посланных к Венере, такие системы обеспечивали наведение на Землю антенн для связи с Землей. В советских космических кораблях «Восток» системы ориентации применялись для обеспечения спуска кабины с космонавтом в заданный район Земли. Эти системы необходимы также для выполнения КА таких задач, как наблюдение за поверхностью Земли, проведение с его борта астрофизических наблюдений и т. п.

В космической навигации для определения положения КА в пространстве применяются методы астронавигации, основанные на слежении и измерении в определенной системе координат углового положения известных звезд или Солнца относительно КА. Для межпланетной навигации выбирается обычно гелиоцентрическая система с базовым светилом — Солнцем в начале координат

(рис. 24), а при полетах ИСЗ таким базовым светилом в системе координат выбирается Земля.

Для космических полетов в пределах солнечной системы Солнце является наиболее подходящим базовым небесным объектом для системы астронавигации КА, так как оно является здесь самым мощным источником лучистой энергии. Аппаратура для ориентации по солнечному излучению может быть поэтому гораздо более простой и надежной, чем при использовании излучения другой звезды. Ориентация по Солнцу при полете необходима также и для обеспечения работы солнечных батарей КА.

В системах навигации КА наряду с радиотехнической аппаратурой применяются и оптико-электронные устройства, работающие

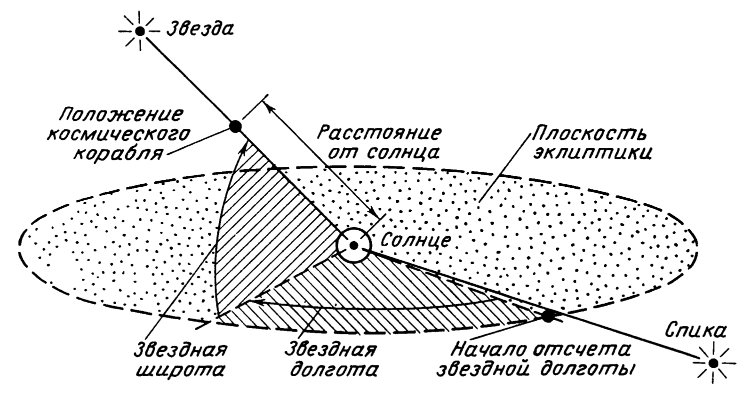


Рис. 24. Система координат для межпланетной навигации.

в видимом и ИК диапазонах волн. Бортовые ИК приборы используются в автоматических системах ориентации космических кораблей (КК) для определения в выбранной системе координат направления на Солнце или яркую звезду по их ИК излучению, а также для вычисления расстояния по видимому угловому размеру светила (по измерению видимого диаметра) или величине его теплового излучения.

Выбор направления ориентации для определения местоположения КА или приведения его в необходимое положение, а также состав навигационной аппаратуры зависят от назначения КА и траектории его полета. В канал системы управления по каждой координате (рис. 25) входят ИК измерительное устройство (датчик) *1*, усилительно-преобразующее устройство *2* и исполнительные органы *3*. Датчик системы ориентации *1* состоит обычно из приемного объектива, устройства, просматривающего пространство, оптического модулятора (прерывателя) и ИК приемника. В приемнике промодулированный модулятором лучистый поток от светила преобразуется в электрические сигналы, несущие информацию о положении светила относительно направления оптической оси объектива. Усилительно-преобразующее устройство усиливает и преобразует сигналы рассогласования, выработанные датчиком, в команды управления исполнительными органами, разворачивающими КА *4* в нужном направлении.

Приборы, предназначенные для автоматического определения положения КА по взаимному расположению и расстоянию до выбранных небесных объектов, называются **астроориентаторами**. На рис. 26 изображена структурная схема астроориентатора для определения положения КА по трем светилам, одним из которых является Солнце. В состав этого прибора входят три оптико-

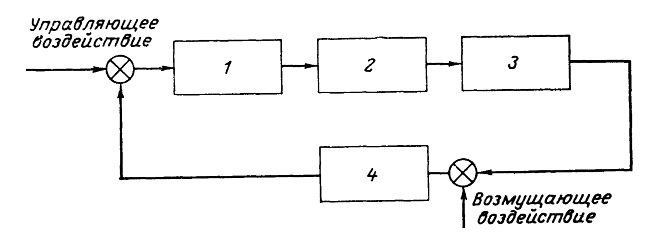


Рис. 25. Схема автоматической системы ориентации относительно одной оси.

1 — измерительное устройство (датчик); *2* — усилительно-преобразующее устройство, *3* — исполнительные органы; *4* — летательный аппарат.

электронные следящие системы, определяющие расстояния $D_1 — D_3$ до центров светил $O_1 — O_3$ путем измерения угловых размеров их дисков. Сигналы от них, пропорциональные этим расстояниям, поступают в вычислительное устройство B_1 для вычисления координат КА. Туда же поступают с вычислительного устройства B_2 текущие координаты центров светил $O_1 — O_3$ и данные точного времени с генератора стабильной частоты *Г*. Вычисленные в гелиоцентрической системе координаты *x*, *y* и *z* могут воспроизводиться указателем курса или вводиться в систему управления полетом корабля.

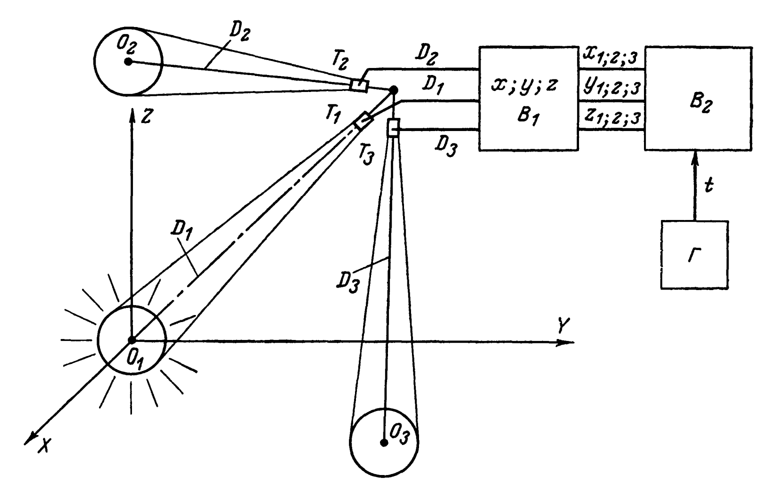


Рис. 26. Структурная схема астроориентатора.

Другим бортовым ИК навигационным прибором КК является *ИК указатель (датчик) горизонта.* Он является одним из основных навигационных приборов в системах навигации ИСЗ и представляет собою прибор, осуществляющий слежение за краем диска Земли (или иной планеты). Действие его основано на измерении температурного перепада между холодным космическим пространством и теплым краем небесного тела. Действительно, при наблюдении из космоса температура Земли составляет 250 К, а фон космоса, окружающий Землю, имеет температуру около 4 К. Такой большой перепад температур позволяет использовать для его регистрации сравнительно простую и малогабаритную следящую ИК систему с малым полем зрения. Она состоит из объектива с расположенным в его фокусе приемником и усилителя на полупроводниковых приборах. С помощью ИК датчика производятся ориентация спутника на орбите относительно земного горизонта и измерение расстояния корабля до выбранной планеты при помощи определения угловых размеров ее диска. В иностранной печати сообщалось о разработке такого датчика массой 0,9 кг и мощностью потребления 0,40 Вт для системы стабилизации ИСЗ.

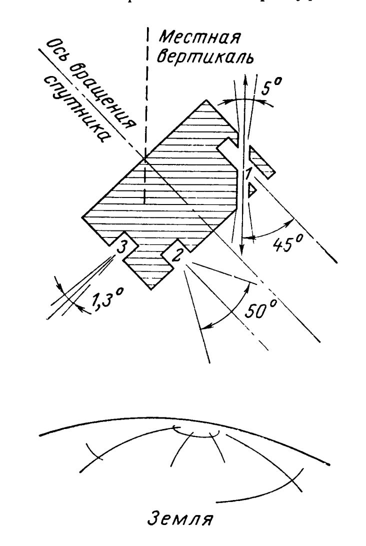


Рис. 27. Размещение ИК аппаратуры на ИСЗ „Тирос-II“.

1 — пятиканальный радиометр; *2* — двухканальный радиометр; *3* — указатель горизонта.

Инфракрасный указатель горизонта *3* **устанавливается на** ИСЗ таким образом (рис. 27), чтобы оптическая ось его объектива составляла с осью вращения спутника прямой угол. Поэтому при вращении ИСЗ в поле зрения объектива попадают попеременно космическое пространство и диск Земли. В результате на выходе приемника возникают импульсы, длительность которых соответствует времени нахождения Земли и космоса в поле зрения объектива прибора (рис. 28). При известной орбите спутника по соотношению длительностей этих импульсов можно определить угол между осью вращения ИСЗ и местной вертикалью Земли (направление на центр земного диска от ИСЗ). Это даст возможность определять координаты спутника над земной поверхностью и тем самым — координаты участков Земли, просматриваемых его научной аппаратурой. Для определения *местной (ИК) вертикали* в навигационных системах КА применяются ИК указатели горизонта. Наиболее простой способ построения вертикали — нахождение центра диска наблюдаемого небесного тела по его собственному ИК излучению. Этот способ позволяет наблюдать диск Земли с любой стороны независимо от положения Солнца. Для построения местной ИК вертикали на спутнике применяются два ИК указателя горизонта (рис 29). При сканировании их датчиков *9* и

10 по азимуту и углу места на выходе каждого датчика возникают прямоугольные импульсы, которыми определяются тепловые границы диска Земли по двум координатам (см. рис 28). Поделив пополам полученные углы, определим направление на центр земного диска, т. е. местную ИК вертикаль

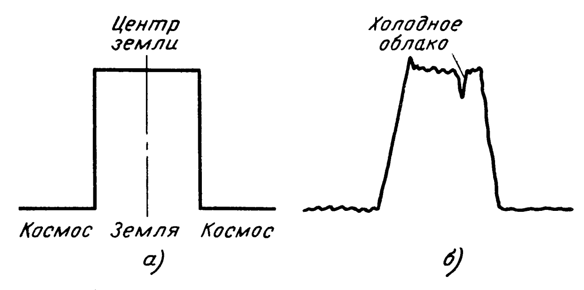


Рис. 28. Импульсы сигнала от датчика горизонта.
а — идеальный; *б* — действительный, на котором видно влияние холодного облака.

Для надежной работы ИК указателя горизонта очень важен правильный выбор рабочего участка ИК диапазона спектра: он должен находиться в пределах окна прозрачности атмосферы Земли для ИК излучения и в нем должен быть достаточно низким уровень фона, создаваемого солнечным излучением. Наиболее подходящим участком ИК спектра для работы указателя горизонта ИСЗ является атмосферное окно в диапазоне от 7 до 14 мкм. В диапазоне волн более 7 мкм Солнце излучает менее 1%, а Земля — более 99%

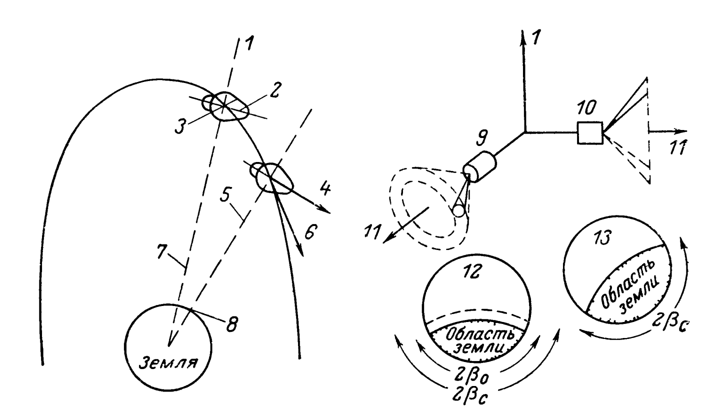


Рис. 29. Схема действия ИК датчиков горизонта на ИСЗ.
1 — местная вертикаль; *2* — местная горизонталь; *3* — ось тангажа; *4* — горизонтальная составляющая скорости; *5* — вертикальная составляющая скорости; *6* — вектор скорости; *7* — вертикальная ось; *8* — горизонтальная ось; *9* — опорный датчик; *10* — второй датчик; *11* — горизонт; *12* — зона развертки опорного датчика; *13* — зона развертки второго датчика.

своей энергии. Применение этого диапазона для указателя горизонта позволяет создать систему ориентации и стабилизации ИСЗ, надежно работающую в любое время суток. Для устранения возможности попадания на вход приемника более коротковолнового излучения в объективе прибора устанавливается ИК фильтр, не пропускающий излучения с длиной волны менее 7 мкм.

В межпланетных космических полетах может потребоваться ориентация КА относительно местной вертикали других планет. Это необходимо для наведения научной аппаратуры при исследовании планеты и для выполнения посадки на нее КА. Правильная

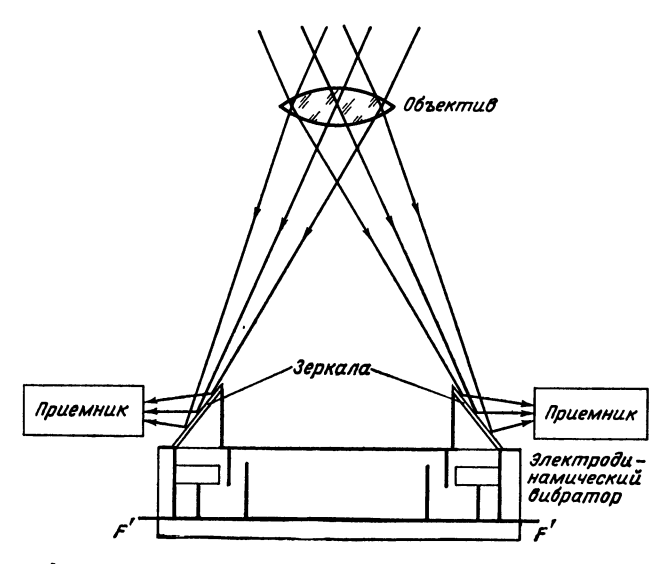


Рис. 30. Схема датчика прибора определения местной ИК вертикали.

ориентация КА относительно Солнца, Земли и планеты позволяет обеспечить также передачу на Землю результатов наблюдения по линии радиосвязи. Рабочий участок ИК спектра указателя горизонта определяется в этом случае спектром излучения планеты, к которой подлетает корабль.

Одна из возможных схем построения датчика прибора для определения местной ИК вертикали изображена на рис. 30. В датчике используются четыре плоских зеркала, расположенных попарно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Изображение Земли создается линзовым объективом в фокальной плоскости $F'-F'$. Изображения небольших участков краев земного диска проектируются в каждой плоскости двумя зеркалами на два приемника из сурьмянистого индия. Каждое зеркало установлено на пружине, прикрепленной одним концом к корпусу датчика, а другим — к катушке электродинамического вибратора. При колебаниях катушки оба зеркала синхронно поворачиваются, и диаметрально противоположные изображения краев земного диска перемещаются по

чувствительным площадкам приемников. Если изображение Земли не находится на оптической оси объектива, то импульсы от обоих приемников будут иметь разную длительность. Усилительно-преобразующее устройство сравнивает длительности импульсов от каждой пары приемников и формирует сигнал управления, пропорциональный величине смещения изображения Земли относительно оптической оси прибора.

На рис. 29 изображена схема работы системы стабилизации ИСЗ. В ее состав входят два датчика горизонта *9* и *10*, расположенных в горизонтальной плоскости, перпендикулярной местной вертикали спутника *1*, и работающих по двум взаимно перпендикулярным осям. Оптическая ось одного (опорного) датчика *9* совмещается с местной горизонталью ИСЗ *2*, а ось второго направлена вдоль оси угловых перемещений спутника в плоскости орбиты *3* (оси тангажа). Полученные на выходе датчика горизонта напряжения пропорциональны площадям обозреваемых ими участков земной поверхности *12* и *13*. Ошибка в положении ИСЗ определяется путем сравнения обоих сигналов. В результате вычисляется угол между истинной горизонталью в данной точке траектории спутника и осью опорного датчика. Сигналы с выходов датчиков поступают в счетно-решающее устройство прибора, вырабатывающее команды для системы управления положением ИСЗ.

Инфракрасные приборы предполагается использовать в разрабатываемых системах встречи и стыковки КА на орбите. Операции встречи и стыковки необходимы для выполнения целого ряда космических программ, в том числе исследований Луны и ряда планет, а также связанных с ними таких задач, как сборка больших космических станций, заправка топливом, доставка материалов и продуктов питания для обеспечения жизнедеятельности экипажей на космических станциях, смена экипажей, проведение аварийно-спасательных работ и т. п.

Для обеспечения встречи и стыковки КА на орбите, а также осуществления высоконаправленной космической связи необходимо с высокой точностью измерять угловые координаты встречного космического корабля и расстояние до него. Во многих случаях необходимо с высокой точностью обнаруживать и другие космические объекты и затем определять их координаты. При решении этих задач большое место отводится и инфракрасным средствам, имеющим целый ряд преимуществ перед радиолокационными и поэтому находящим широкое применение для этих целей в космической технике.

По своей угловой разрешающей способности ИК системы могут превосходить аналогичные радиолокационные в десятки, а иногда и в сотни раз. Так, например, при диаметре антенны радиолокатора 75 см на длине волны 3 см угловая ширина его луча составляет 2,25°. Для повышения точности радиолокатора следует уменьшить ширину луча, а для этого необходимо или увеличить диаметр антенны, или использовать более короткую волну излучения передатчика. Ведь угловая разрешающая способность радиолокатора пропорциональна отношению d/λ, где d — диаметр антенны, а λ — рабочая длина волны. В ИК системах это отношение составляет 10^4.

В системах встречи ИК приборы могут обеспечивать поиск и обнаружение встречного КК, определение параметров относительного движения сближающихся кораблей и наведение маневрирующего корабля на другой корабль. При этом пассивные ИК системы

могут обнаружить встречный КК по его собственному или отраженному солнечному излучению, а также по сигналам установленного на нем ИК маяка. В активных ИК системах на маневрирующем КК устанавливается ИК передатчик, облучающий встречный КК. Отраженный сигнал используется ИК аппаратурой (теплопеленгатором) маневрирующего корабля для осуществления операции встречи. Для увеличения дальности действия аппаратуры на встречном КК можно установить специальные уголковые отражатели, значительно уве-

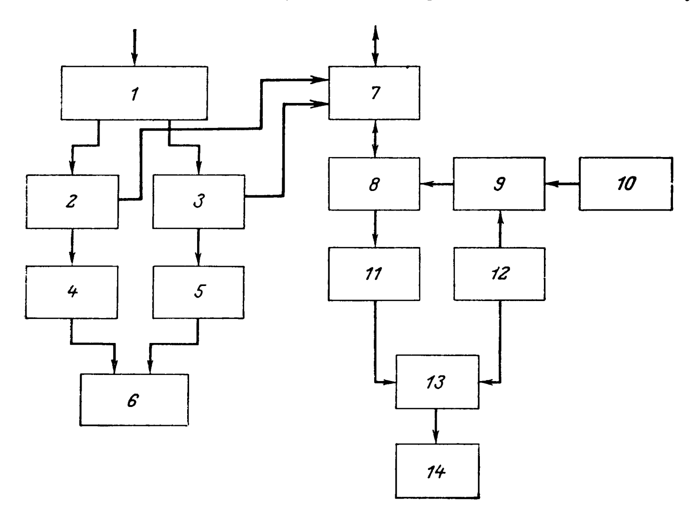


Рис. 31. Структурная схема комбинированной оптической системы встречи космических кораблей на орбите.

1 — инфракрасная следящая головка; *2* — сервопривод по азимуту; *3* — сервопривод по углу места; *4* — декодер азимута; *5* — декодер угла места: *6* — индикаторы азимута и угла места; *7* — сканирующая оптическая система; *8* — приемно-передающая оптическая система; *9* — электронно-оптический модулятор; *10* — ОКГ; *11* — фотоприемник; *12* — источник модуляции; *13* — фазовый детектор; *14* — индикатор дальности и скорости.

личивающие отражательную способность корабля. В активных ИК системах встречи наиболее перспективными источниками ИК излучения являются оптические квантовые генераторы — лазеры.

По сообщениям иностранной печати в США было разработано несколько проектов систем встречи КК. В некоторых из них предусматривалось использование комбинированных оптико-электронных систем с предварительным наведением узкого луча лазерного дальномера на встречный корабль пассивной ИК системой (теплопеленгатором). Структурная схема комбинированной оптико-электронной системы встречи КК на орбите, разработанной по одному из таких проектов, изображена на рис. 31. Инфракрасная следящая система (на рис. 31 слева) работает по ИК маяку, установленному на встречном корабле. Она производит обнаружение и определяет угловые координаты этого корабля для наведения на него луча дальномера (на рис. 31 справа) на газовом лазере *10*. Для измерения дальности в этом лазерном дальномере используется фазовый

метод измерения, обеспечивающий более высокую точность, чем импульсный. Система позволяет измерять дальность в диапазоне от 300 до 1000 м с точностью 1 м. При этом точность определения углового положения встречного КК составляет 10 угловых секунд.

Дальнейшее развитие ИК техники и особенно применение в ее активных системах ОКГ открывает большие возможности в разработке высокоточных, чувствительных и быстродействующих автоматических ИК систем слежения за космическими объектами и измерении расстояния до них в очень больших пределах.

Успехи в освоении космоса вызвали интерес к возможности использования ИК излучения для осуществления *связи между КА*.

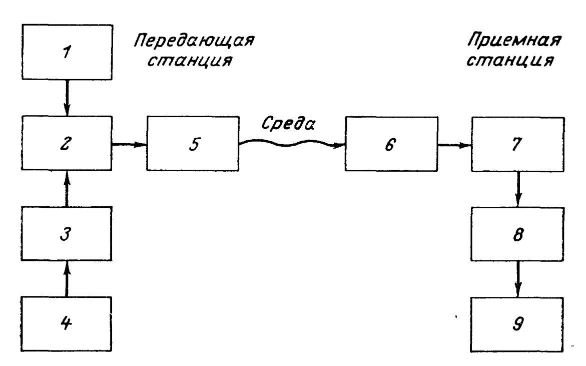


Рис. 32. Структурная схема линии связи на инфракрасных лучах.

1 — источник ИК лучей; *2* — электронно-оптический модулятор; *3* — усилитель; *4* — микрофон, *5*, *6* — оптические системы; *7* — ИК приемник; 8 — детектор, *9* — телефон.

В космосе вне земной атмосферы ИК средства связи не только не уступают аппаратуре радиосвязи, но и способны обеспечить гораздо бо́льшую дальность действия и передачу бо́льших объемов информации. Как показывают расчеты, в пределах ИК участка спектра можно разместить много миллионов каналов связи. Источниками ИК излучения в связных передатчиках могут быть как естественные излучатели (солнечный свет или тепловое излучение КК), так и искусственные. В первом случае необходимость в специальных передатчиках отпадает. Крайне малая длина волн ИК излучения позволяет использовать малогабаритные оптические антенные системы, формирующие пучок расходимостью в десятые и даже сотые доли градуса, и тем самым существенно снизить необходимую мощность излучателя. Структурная схема системы связи в ИК диапазоне волн представлена на рис. 32. По своему построению она аналогична системам связи радиодиапазона.

Обычные некогерентные источники ИК излучения (лампы накаливания, газоразрядные лампы, дуги, солнечный свет и др.) обладают сравнительно широким спектром излучения. Поэтому они позволяют создать практически только один канал связи. Применение лазеров, генерирующих монохроматическое (одноцветное) когерентное ИК излучение, позволяет создать в космосе многоканальную линию связи с высоким отношением сигнал/шум. Можно пред-

полагать, что ИК системам космической связи на лазерах предстоит сыграть важную роль в обеспечении космических и межпланетных полетов.

Однако при разработке систем космической связи на ИК лучах придется столкнуться с рядом трудностей. К ним, в частности, относится необходимость создания систем точного слежения для взаимного наведения антенн передающей и приемной станций линии связи друг на друга. Потребуется решение ряда сложных технологических и конструктивных вопросов, связанных с разработкой аппаратуры, отвечающей требованиям эксплуатации в условиях космоса. Подробнее о системах космической навигации и связи с использованием ОКГ можно прочитать, например, в книге Ю. Борисова «Лазер служит человеку» (М., «Энергия», 1973 г.).

Разнообразные научные исследования могут проводиться с помощью ИК приборов, установленных на борту КА. Собранные в единый бортовой комплекс, эти приборы обеспечивают исследование радиационных характеристик Земли и атмосферы, изучение динамики изменения теплового баланса Земли, перемещение и развитие облачного покрова и т. д. Для этого используются такие виды ИК аппаратуры, как фотометрические и фототелевизионные приборы, а также специальная радиометрическая аппаратура.

Многочисленные астрофизические исследования, проводимые в разных странах мира, позволяют получить большое количество разнообразных сведений о планетах и звездах. Наибольший интерес представляет спектральный анализ излучения небесных тел, с помощью которого можно определить температуру звезды, химический состав и строение ее атмосферы, направление движения по отношению к наблюдателю, удаленность и даже возраст. Значительная часть полученных в этой области сведений приходится на долю спектральных исследований в ИК области спектра.

Большинство астрофизических исследований космического пространства было выполнено с земной поверхности. Однако такие исследования с помощью наземных астрофизических приборов связаны с рядом ограничений из-за того, что атмосфера Земли для целого ряда участков ИК спектра непрозрачна. Непостоянство влажности воздуха, облачного покрова и климатических условий, свечение верхних слоев атмосферы также ограничивают возможности проведения астрофизических исследований с поверхности Земли и снижают их точность. Для получения более точных и полных данных ИК аппаратура должна быть вынесена за пределы атмосферы. Для этого она может быть поднята на большую высоту на аэростате, ракете или установлена на КА. На исследовательских ракетах астрофизическая аппаратура поднимается на высоту в сотни километров, но время работы ее на этих высотах составляет всего несколько минут. Продолжительные исследования в космосе могут быть осуществлены только аппаратурой, установленной на борту КА. Особенно интересными являются наблюдения с помощью ИК приборов, установленных на автоматических межпланетных станциях (АМС), пролетающих в непосредственной близости от изучаемых планет. Вероятно, в недалеком будущем многие астрофизические исследования в ИК области спектра будут уже проводиться с лунных обсерваторий, поскольку на Луне атмосфера полностью отсутствует.

Вынос ИК исследовательской аппаратуры за пределы земной атмосферы и установка ее на КА позволяют значительно расширить

возможности исследования Вселенной. Поскольку эти исследования еще только начинаются, внеземное изучение ИК излучений звезд планет и космического вещества может принести новые, очень важные и порою совершенно неожиданные результаты.

Большой интерес представляют *внеатмосферные исследования* Солнца — ближайшей к нам звезды в инфракрасном участке спектра: процессы, происходящие на нашем светиле, обусловливают жизненные условия на Земле, влияют на физическое состояние атмосферы планет, межпланетной среды. Исследования Солнца могут дать информацию и о процессах, протекающих в звездах

Одним из важных вопросов современности является возможность существования жизни на других планетах. Для проверки существующих гипотез первостепенное значение имеет изучение спектрального состава атмосферы планет и спектра солнечного излучения, отраженного от их поверхности. Спектрографические исследования излучения планет при помощи ИК аппаратуры, установленной на АМС, особенно с небольшого расстояния, дадут возможность достоверно решить вопрос о наличии на них растительных форм жизни. Сравнение спектра солнечного излучения, поступающего на ИК спектрограф непосредственно от Солнца, и спектра, отраженного от поверхности планеты, позволяет определять спектры поглощения солнечного излучения планетой и участками ее поверхности. По этим спектрам также может быть определено наличие растительной жизни на поверхности планеты.

Изучение Земли и протекающих на ней процессов выдвигается при проведении космических исследований в последние годы на передний план. Это связано с расширяющимися масштабами исследований и требованиями к надежности информации о состоянии окружающей нас среды. Эти сведения необходимы для того, чтобы можно было предсказать, что ожидает нашу планету через несколько десятилетий. В планетарных масштабах они могут быть получены только при помощи ИСЗ, методами так называемой космической дистанционной индикации различных земных явлений и факторов.

Преимущества применения спутников состоят и в том, что за сравнительно небольшой промежуток времени с их помощью можно провести измерения во многих точках земного шара. Особенно велика ценность информации, собираемой ИСЗ с обширных территорий океанов, полярных областей, пустынных и горных районов, занимающих около 80% земной поверхности.

Наблюдениями из космоса возможно охватить большие участки земной поверхности и в короткие сроки получить при необходимости нужную информацию. Полученные советскими учеными в последнее десятилетие этими методами с метеорологических ИСЗ, АМС, пилотируемых КК и орбитальных станций данные многое внесли в изучение Земли. В число научных приборов, устанавливаемых для этого на ИСЗ, входят различные ИК спектральные и радиометрические приборы, обнаруживающие и регистрирующие тепловое излучение наземных объектов и земной поверхности. Они применяются для исследования характеристик уходящего теплового излучения Земли, составления тепловых (термографических) карт облачного покрова и поверхности Земли, измерения теплового излучения и коэффициентов отражения участков земной поверхности Действие их основано на использовании различий в температурах и коэффициентах излучения различных участков поверхности ландшафта Высокая степень разрешения этих ИК приборов позволяет

получать не только изображения участков ландшафта, но и отдельных теплоизлучающих объектов.

По методу регистрации излучений эти приборы подразделяются на термографические, в которых получаемая информация записывается видеомагнитофоном или другим подобным регистрирующим устройством, и тепловизионные, в которых для передачи изображения на Землю используется телевизионный канал или доставка фотографий получаемой картины.

Исследование характеристик уходящего ИК излучения Земли необходимо для решения целого ряда прикладных задач геофизики и метеорологии, в частности для составления достаточно полного и точного теплового баланса отдельных участков земной поверхности и Земли в целом как планеты с учетом суточных и сезонных изменений. Для точного определения характеристик уходящего в космос земного излучения необходимо производить глобальные радиометрические измерения с ИСЗ. За последние годы были получены первые экспериментальные данные, характеризующие радиационный баланс системы Земля — атмосфера, хотя точность таких измерений со спутников пока еще сравнительно невелика.

Такие измерения проводились, в частности, на американских спутниках «Тирос» и «Нимбус» и советских ИСЗ серий «Космос» и «Метеор». Размещение радиометров на ИСЗ «Тирос-II» показано на рис. 27. На его борту были установлены пятиканальный радиометр *1* с малым полем зрения (5°) и двухканальный радиометр *2* с широким полем зрения. Пятиканальный радиометр *1* производил измерения в участках ИК спектра, соответствующих спектрам солнечного излучения, отраженного от земной поверхности и от облаков, собственного излучения Земли, излучения водяных паров атмосферы в окне прозрачности атмосферы 7,5—12 мкм. Оптическая ось этого прибора расположена под углом 45° к оси вращения ИСЗ и при вращении спутника в полете он просматривает своим полем зрения, перемещающимся в пространстве по дугообразным кривым, земную поверхность и космическое пространство. Принятое излучение после модуляции механическим прерывателем поступает попеременно на приемники. При этом излучение Земли сравнивается с космическим фоном, принятым за опорный уровень.

С выхода приемника снимается напряжение, пропорциональное разности обоих излучений, которое после усиления в транзисторном усилителе передается по каналу радиосвязи на Землю. При движении спутника по орбите оптические системы каналов радиометра просматривают на земной поверхности площадь размером около 50×50 км. Двухканальный радиометр с широким полем зрения *2* предназначен для измерения баланса между отраженным от земной поверхности солнечным излучением и собственным излучением Земли.

В экспериментах по исследованию распределения энергии в спектре теплового излучения Земли советскими ИСЗ «Космос-45» и «Космос-65» был применен дифракционный сканирующий спектрофотометр со спектральным диапазоном 7—38 мкм. Отснятая пленка с результатами измерений доставлялась на Землю в контейнере.

Возможности метеослужб в составлении прогнозов погоды значительно расширяются запуском метеорологических ИСЗ. Одно из важных мест при этом составляет информация о тепловом состоянии поверхности Земли и атмосферы, получаемая от бортовой ИК аппаратуры этих ИСЗ. По результатам обработки данных, по-

лучаемых в процессе полета спутника, составляются радиационные карты земной поверхности. В любое время и в любом районе земной поверхности с помощью метеорологических ИСЗ могут быть определены такие характеристики погоды, как температура, давление, состав, влажность и плотность воздуха. С ИСЗ можно следить за образованием, характером, передвижением и распространением облаков, формированием воздушных потоков. Так, например, распределение облаков по земному шару дает возможность судить о движении воздушных масс, образовании циклонов и антициклонов и о прочих атмосферных явлениях. Установленные на спутнике ИК приборы позволяют наблюдать из космоса за распределением облачного покрова над большими участками земной поверхности. Снимки облачных образований, получаемые при помощи ИК приборов, менее детальны, чем телевизионные изображения, но они достаточно подробны для анализа крупных атмосферных образований: циклонов, тайфунов и т. п.

Состояние погоды на Земле во многом зависит от величины излучения более нагретых областей земной поверхности, возникающего при поглощении солнечного света. Поэтому сопоставление термографических карт с обычными синоптическими приводит к получению дополнительных сведений и тем самым к уточнению метеорологами прогнозов погоды.

Температура участков земной поверхности может быть весьма точно измерена также спектрометрами, определяющими спектральный состав излучения ее в узких участках спектра. Ими также могут быть обнаружены на земной поверхности излучающие объекты.

Метеорологические ИСЗ типа «Тирос» (США) смогли обеспечить около 10% информации для анализа погоды и составления прогнозов для небольших областей и около 20% — для прогнозирования на больших областях и составления пятидневных прогнозов. Дальнейшее совершенствование измерительной аппаратуры для таких целей позволит увеличить эти цифры до 60 и 90% соответственно. При этом необходимо иметь в виду, что метеорологические ИСЗ получают такие же данные, необходимые для составления прогнозов погоды, которые не могут быть получены никакими другими способами. Результаты наблюдений с этих ИСЗ в ИК области спектра могут быть использованы также при изучении возможности наблюдения на фоне земного излучения различных излучающих объектов как на поверхности Земли, так и за пределами ее атмосферы.

На отечественных метеорологических ИСЗ системы «Метеор» применяется различная актинометрическая, телевизионная и прочая оптико-электронная аппаратура для изучения состояния погоды на земном шаре. Актинометрическая аппаратура предназначена для определения величины собственного теплового излучения земной поверхности и верхнего слоя облачного покрова в диапазоне волн от 8 до 12 мкм, солнечного излучения, отраженного поверхностью Земли на волнах 0,3—3 мкм и полного излучения земной поверхности и облачного покрова в диапазоне волн 3—30 мкм. Принцип ее действия основан на поглощении излучений телом, близким по своим свойствам к абсолютно черному, и преобразовании его в тепловую энергию. В состав аппаратуры входят радиометр с широким полем зрения, сканирующий радиометр с узким полем зрения, электронный блок и вспомогательная аппаратура.

Для исследования природных ресурсов Земли применяется фотографирование ее поверхности с ИСЗ одновременно в видимом и инфракрасном участках оптического диапазона волн. Это дает возможность за счет различий в коэффициентах поглощения и отражения природных образований в разных участках оптического диапазона полнее изучать их свойства и особенности, а также производить их разведку и идентификацию.

Спектрофотографирование и многозональная съемка участков поверхности Земли для изучения различных природных образований на территории нашей страны в интересах народного хозяйства производились со многих отечественных КК типа «Союз» и станций «Салют-1» и «Салют-3». Задача состояла в том, чтобы по спектру точно распознавать различные природные образования на поверхности Земли, состояние ее поверхности.

Исследования Земли и Вселенной в ИК диапазоне были продолжены во время полета станции «Салют-4» с помощью установленного на ее борту инфракрасного зеркального телескопа-спектрометра ИТС-К. Такая аппаратура была впервые вынесена этой орбитальной станцией за пределы атмосферы Земли. При помощи телескопа ИТС-К осуществлялась регистрация излучений Земли, Луны и Сатурна в ИК области спектра, исследовались ИК излучения объектов, находящихся в плоскости Галактики и созвездии Кассиопеи, а также излучение диффузного фона Галактики вдоль ее меридиана.

Исследования ИК излучения Земли ведутся с целью дальнейшего изучения теплового режима ее атмосферы, распределения в ней водяного пара и других компонентов на разных высотах. Результаты этих измерений имеют большое научное и практическое значение для оценки загрязнения атмосферы Земли, а также для разработки методов контроля за ее состоянием. Спектральный состав ИК излучения Луны может дать новые сведения о ее поверхностном слое — реголите, образцы которого были доставлены на Землю советскими станциями «Луна-16» и «Луна-20».

Включение в программу исследования ИК излучений Галактики вызвано тем, что в последние годы было установлено, что во Вселенной основная часть выделенной энергии приходится на ИК диапазон. Поэтому в качестве объектов исследований и были выбраны источники в пределах Галактики, различные нестационарные объекты в космосе, так как именно там имеет место наиболее интенсивное выделение энергии. Эти исследования помогают лучше понять законы Вселенной.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают возможные области применения ИК техники в космических исследованиях. Развитие этой области техники идет столь быстрыми темпами, что круг задач, решаемых здесь с ее помощью, несомненно будет возрастать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вы прочитали эту книгу о различных видах применения инфракрасной техники в современной науке и технике, на Земле и в космосе. Со времени открытия ИК лучей прошло уже более 170 лет, однако только в последние десятилетия они начали получать широкое практическое применение. Этому в немалой степени способствовали значительные успехи в области фотоэлектроники в отношении

улучшения характеристик ИК приемников для диапазона 1,5—10 мкм.

Освоение инфракрасного диапазона волн наглядно показывает путь, пройденный наукой в своем развитии от использования вначале только механических, а затем и физических свойств веществ (в XIX и начале XX века) к использованию свойств атомов и молекул веществ в наше время. В своем развитии наука и техника одновременно с расширением фронта проводимых исследований производят непрерывное сближение и взаимодействие различных их областей. Это приводит как к их взаимному обогащению и уточнению существующих теорий, так и к возникновению новых отраслей в исследовании законов природы, к открытию новых возможностей их применения. Инфракрасная техника возникла и начала развиваться как новое направление из таких уже существовавших отраслей знания, как физика, оптика, спектроскопия, электроника, полупроводниковая техника, в результате их подъема на более высокий уровень развития. Можно только удивляться разнообразию областей физики, нашедших применение в этой отрасли знания

В последние десятилетия интерес к ИК аппаратуре значительно возрос. Успехи, достигнутые в развитии ИК техники, показали большие возможности и перспективы ее практического применения не только в самых разнообразных областях современной науки и техники, но и в народном хозяйстве для нужд промышленности, сельского хозяйства, в медицине, биологии, астрономии и т. д. Все большее значение приобретает ИК техника в развивающихся астрофизических исследованиях и, в частности, в изучении Земли, планет и космического пространства. Значение ИК техники еще более возрастает в связи с широко развернувшимся изучением космического пространства. С каждым годом число областей применения ИК техники увеличивается. Все большее значение приобретают спектроскопические исследования молекулярной структуры веществ в ИК лучах. Инфракрасная спектроскопия стала эффективным средством исследования молекулярных структур веществ, особенно сложных органических соединений. Эти исследования показывают, что именно в области взаимодействия фотонов ИК излучения с веществом находится наиболее многообещающее поле научных исследований.

Дистанционные измерения температуры тел по их ИК излучению используются как существенная часть систем автоматического контроля различных процессов.

Расширяются области применения ИК аппаратуры и в военной технике.

Одной из отличительных особенностей ИК техники является преимущественное развитие различных пассивных приборов, работающих в основном в ближней и средней областях ИК спектра, для которых разработаны эффективные приемники излучения. Использование для практического применения дальней области ИК спектра осложняется пока отсутствием подходящих приемников. Вместе с тем эта область представляет значительный интерес для специалистов, так как все естественные слабо нагретые физические тела создают ИК излучения именно в этой области спектра и для их изучения желательно применять пассивные ИК приборы, работающие в этой же области ИК спектра вместо более сложных активных приборов.

Новый этап в развитии ИК техники начался после возникновения квантовой электроники и появления мощных ОКГ, излучающих в ИК диапазоне волн. Появление лазеров значительно расширило возможности и области применения активных ИК приборов в современной науке и технике.

Успешное применение ИК техники в научных исследованиях и народном хозяйстве показывает большие возможности дальнейшего ее практического использования.

В книге рассмотрены кратко те возможности, которые инфракрасная техника предоставляет науке и технике уже в настоящее время, а также некоторые перспективы ее дальнейшего применения. В ней рассказано далеко не о всех возможных областях применения ИК техники, однако и те сведения, которые здесь приведены, хорошо показывают ее большие возможности. Для их реализации предстоит еще большая работа ученых, инженеров и конструкторов, направленная на усовершенствование ИК аппаратуры и на дальнейшее расширение сферы ее применения, которого, несомненно, следует ожидать.

В настоящее время весьма затруднительно предсказать все области возможного применения ИК техники, можно лишь с уверенностью сказать, что роль этой молодой области знаний как на Земле, так и в космосе будет непрерывно возрастать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козелкин В. В., Усольцев И. Ф.** Основы инфракрасной техники. М., «Машиностроение», 1974, 336 с.

2. **Левитин И. Б.** Инфракрасная техника. Л., «Энергия», 1973, 160 с.

3. **Изнар А. Н. и др.** Оптико-электронные приборы космических аппаратов. М., «Машиностроение», 1972, 368 с.

4. **Справочник** по радиоэлектронике. Под ред. Куликовского А. А. т. 3, раздел 28, М., «Энергия», 1970, 816 с.

5. **Большая** советская энциклопедия. Изд. 3-е, т. 10, М., «Советская энциклопедия», 1974, 592 с.

6. **Марков М. Н.** Приемники инфракрасного излученяи. М., «Наука», 1968, 168 с.

7. **Хэкфорд Генри.** Инфракрасное излучение. М.—Л., «Энергия», 1964, 336 с.

8 **Иванов Ю. А., Тяпкин Б. В.** Инфракрасная техника в военном деле. М., «Советское радио», 1963, 359 с.

9. **Павлов А. В.** Оптико-электронные приборы. М., «Энергия», 1974, 360 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Юрий Борисов

ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Редактор И. В. Лебедева
Редактор издательства Г. Н. Астафуров
Технический редактор Н. Н. Левченко
Обложка художника А. А. Иванова
Корректор А. Д. Халанская

Сдано в набор 7/X 1975 г. Подписано к печати 11/III 1976 г. Т-05625
Формат 84 × 108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,94 Уч.-изд. л. 3,89
Тираж 40 000 экз. Зак. 505 Цена 17 коп

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Набрано в Московской типографии № 13 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
107005, Москва, Б-5, Денисовский пер., д. 30

Отпечатано в Московской типографии № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., д. 10 Зак. 638.

Цена 17 коп.